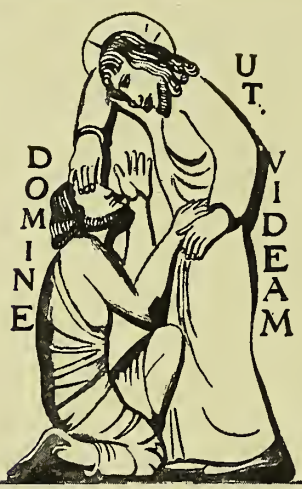
No. 6921/D

31




THE INSTITUTE
OF
OPHTHALMOLOGY
LONDON

EX LIBRIS

B/C 2809390848

Digitized by the Internet Archive
in 2014

https://archive.org/details/b21287314_0

OPHTHALMOLOGY HCF HELMOLZ [2]

B 3 2
25

# Handbuch

der

# Physiologischen Optik

von

## H. von Helmholtz.

**Dritte Auflage**

ergänzt und herausgegeben in Gemeinschaft mit

**Prof. Dr. A. Gullstrand** und **Prof. Dr. J. von Kries**
Upsala Freiburg

von

**Professor Dr. W. Nagel** (†)
Rostock

**Zweiter Band**

Mit 80 Abbildungen im Text und 3 Tafeln

**Die Lehre von den Gesichtsempfindungen**

herausgegeben von Prof. Dr. **W. Nagel** und Prof. Dr. **J. v. Kries**

Hamburg und Leipzig
Verlag von Leopold Voss
1911.

Druck von Metzger & Wittig in Leipzig.

# Vorwort.

Mit dem nunmehr vorliegenden zweiten Bande erreicht die Neuausgabe der Physiologischen Optik ihren Abschluß, später und anders als bei Beginn des Unternehmens gedacht worden war. Der Herr Herausgeber, Professor Dr. W. A. Nagel, der zugleich die Bearbeitung des zweiten Bandes übernommen hatte, erlitt Ende März 1910 einen Unfall, in dessen Folge sich eine schwere, schließlich zum Tode führende Erkrankung entwickelte. Er hatte, als er seine Arbeit abbrechen mußte, die Revision des Helmholtzschen Textes fertiggestellt, ebenso die kleineren, diesem eingefügten Ergänzungen. Von den geplanten größeren Zusätzen war der erste (Über Adaptation, Dämmerungssehen und Duplizitätstheorie) gleichfalls geschrieben, gesetzt und erstmals korrigiert. Als sich die Notwendigkeit herausstellte, die Vollendung der Arbeit anderen Händen anzuvertrauen, richtete der Herr Verleger an mich die Bitte, die Aufgabe zu übernehmen; und ich bin diesem Wunsche nachgekommen, nicht ohne manche Bedenken, schließlich aber durch den Umstand bestimmt, daß ich, Nagel persönlich nahestehend, mit seinen Absichten in der Hauptsache bekannt und von seinen Auffassungen nirgend erheblich abweichend, am ehesten in der Lage war, dem von ihm Begonnenen einen sich einigermaßen harmonisch anfügenden Abschluß zu geben. Auch für mich freilich war dies dadurch erschwert, daß Nagel den Plan für die noch ausstehenden Zusätze (wie manche Voraus-Verweisungen erkennen ließen) in detaillierter Weise festgestellt hatte, schriftliche Aufzeichnungen darüber jedoch, abgesehen von einer ganz summarischen Disposition, nicht vorlagen. Hier also war ich in der Hauptsache doch genötigt, eigenem Ermessen zu folgen. Bezüglich des ersten Zusatzes anderseits waren größere Änderungen, abgesehen davon, daß er, wie erwähnt, schon gesetzt vorlag, auch durch die dem Verfasser und seinem Andenken geschuldete Rücksicht ausgeschlossen. Es könnte daher wohl sein, daß die Übelstände, die in einigem Betrage bei dem

ganzen Unternehmen unvermeidlich waren, nämlich ein gewisser Mangel an Einheitlichkeit, vielleicht auch an Vollständigkeit, sich bei diesem Bande mehr als beim ersten und dritten bemerkbar machten. Sollte dies der Fall sein, so dürfte wohl auf die besonderen, durch den Wechsel der Bearbeitung bedingten Schwierigkeiten als entschuldigende Erklärung hingewiesen werden. — Das alphabetische Sachregister für alle drei Bände ist am Schlusse dieses Bandes angefügt; ebenso einige Berichtigungen.

Freiburg, im April 1911.

**v. Kries.**

# Inhaltsverzeichnis.

## Die Lehre von den Gesichtsempfindungen.


Seite

§ 17. **Von der Reizung des Sehnervenapparats** . . . . . 3

Reizbarkeit und spezifische Energie der Nerven 3—6; Reizung durch Licht 6; mechanische Reizung 6—11; Reizung durch innere Ursachen 11—13; elektrische Reizung 13—17; Geschichte 18—19; Nachtrag von Helmholtz (aus der 1. Aufl.) 19—20.

***Zusatz von W. Nagel*** . . . . . *21*

*Die Reizung des Sehnervenapparats durch Röntgen- und Becquerelstrahlen 21—23.*

§ 18. **Von der Reizung durch Licht** . . . . . 24

Die Substanz des Sehnerven selbst ist unempfindlich gegen Licht 24—28; die hinteren Schichten der Netzhaut sind empfindlich 28—29; davon abhängig die Größe der kleinsten wahrnehmbaren Objekte 29—33; Nachtrag von Helmholtz (aus der 1. Aufl.) 33—34

***Zusatz von W. Nagel*** *(Messung der Sehschärfe)* . . . . . *35*

Genauigkeit des indirekten Sehens 35—38; Geschichte 38—39.

*§ 18A.* ***Zusatz von W. Nagel*** . . . . . *41*

*Die Veränderung der Netzhaut unter der Einwirkung des Lichts 41—52.*

*1. Die Veränderungen des mikroskopischen Bildes der Netzhaut 41—44; 2. Die Bleichung des Sehpurpurs 44—48; 3. Elektromotorische Erscheinung am Auge 48—52.*

§ 19. **Die einfachen Farben** . . . . . 52

Das prismatische Spektrum 52—54; seine Farben und Grenzen 54—59; Ursache der Unsichtbarkeit der überroten und übervioletten Strahlen 59—63; Farbenstufen des Spektrums verglichen mit der Tonleiter 63—64; Theorie der prismatischen Brechung 64—89; Methode für die Herstellung reiner Spektra 89—95; Geschichte der Farbentheorie 95—101.

§ 20. **Die zusammengesetzten Farben** . . . . . 101

Mischung der Farben und der Pigmente 101—105; Qualitäten der Mischfarben 105—111.

Seite

*Zusatz von W. Nagel (Komplementärfarben)* . . . . . *107*

Konstruktion der Farbentafel 111—117; die drei Grundfarben und Th. Youngs Theorie 117—122; Farbenblindheit 122—128; Abhängigkeit der Farbenunterscheidung von der räumlichen Ausdehnung 128—129; andere Theorien der Mischung 129—131; Methoden der Mischung 131—135; Geschichte 135—138; Nachtrag von Helmholtz (aus der 1. Aufl.) 138—144.

§ 21. **Von der Intensität der Lichtempfindung** . . . . . 144

Das psychophysische Gesetz für die Helligkeit 144—151; verschiedenes Gesetz für verschiedene Farben 151—155; Irradiation 155—161; Photometrie 161 bis 168; Geschichte 168—172.

§ 22. **Die Dauer der Lichtempfindung** . . . . . 172

Die scheinbar kontinuierliche Helligkeit intermittierenden Lichts 172—179; Dauer des Eindrucks gemessen 179—181; Einrichtung der Farbenscheiben und Farbenkreisel 181—184; stroboskopische Scheiben 184—187; Anorthoskop 187 bis 190; Nachtrag von Helmholtz (aus der 1. Aufl.) 192—194.

§ 23. **Die Veränderungen der Reizbarkeit** . . . . . 194

Positive Nachbilder 194—198; negative Nachbilder 198—203; komplementäre Nachbilder farbiger Objekte 203—208; farbiges Abklingen 208—216; dasselbe von intermittierendem Licht 216—219; Theorie der Nachbilder 219—224.

§ 24. **Vom Kontraste** . . . . . 224

Sukzessiver Kontrast 224—228; simultaner Kontrast 228—236; Fälle gleichnamiger induzierter Farbe 236—239; Kontrast auf kleinen Feldern 239—249; Nachtrag von Helmholtz (aus der 1. Aufl.) 249; Theorien und Geschichte 249—253.

§ 25. **Verschiedene subjektive Erscheinungen** . . . . . 254

Erscheinungen des gelben Flecks 254—256; Haidingers Polarisationsbüschel 256—259; verschiedene andere Erscheinungen 260—262.

*Zusatz von W. Nagel (Flimmerskotom)* . . . . . *262*

## *Zusatz von W. Nagel.*

### *Adaptation, Dämmerungssehen und Duplizitätstheorie.*

*A. Die Adaptation des Auges für verschiedene Lichtintensitäten* . . *264*

*1. Die Dunkeladaptation 264—274; 2. Die Helladaptation 274—278; 3. Die örtlichen Unterschiede in der Empfindlichkeit 278—282; 4. Die Zunahme der Lichtempfindlichkeit in der Fovea centralis bei Lichtabschluß 282—283; 5. Die Beziehungen zwischen Lichtempfindlichkeit und Größe des gereizten Netzhautbezirks 283—286; 6. Die binokulare Reizsummation 286—289; 7. Kleinste zur Erregung ausreichende Energiemenge 289—290.*

*B. Duplizitätstheorie und Dämmerungssehen* . . . . . *290*

*1. Die Duplizitätstheorie 290—292; 2. Die Qualität der Lichtempfindung im Dämmerungssehen 292—296; 3. Die Dämmerungswerte reiner Lichter 296—302; 4. Das Purkinjesche Phänomen 302—305; 5. Das Fehlen des Purkinjeschen Phänomens in der Fovea centralis 305—308; 6. Das sog. farblose Intervall 308 bis 311; 7. Räumliche und zeitliche Unterscheidungsfähigkeit der Netzhaut im Tagessehen und Dämmerungssehen 311—316; 8. Die totale Farbenblindheit als Isolierung des Dämmerungssehens 316—322; 9. Die Hemeralopie als Störung des Stäbchenapparates 322—324; 10. Theoretisches zur Duplizitätstheorie 324—332.*

## *Zusätze von v. Kries.*

Seite

*I. Normale und anomale Farbensysteme* . . . . . 333

*1. Gesetze der Lichtmischung* . . . . . 333

*Methodisches 333—336; Eichung des Spektrums für Dichromaten 337—339; Protanopen und Deuteranopen 340; Individuelle Unterschiede 341—343; Rayleigh-Gleichung und anomale trichromatische Systeme 343—347.*

*2. Erscheinungen des Tagessehens unter besonderen, die Erkennung der Farben erschwerenden oder ausschließenden Bedingungen* . 247

*Farbenblindheit der Peripherie 347—348; Minimalfeldhelligkeiten 348—349, Andere Methoden der heterochromen Photometrie 349—351; Verhältnisse bei Farbenblinden 352—354.*

*II. Die Theorien des Licht- und Farbensinnes* . . . . . 354

*1. Die Young-Helmholtzsche Theorie 354—357; Beziehung zur Duplizitäts-Theorie 357—359; Modifizierte Helmholtzsche (Zonen)-Theorie 359—360; 2. Andere Theorien der Licht- und Farbenempfindung 360; Vierfarbentheorie 361; Herings Theorie der Gegenfarben 361—364; Theorien von Müller und Schenck 364—365; 3. Die Umstimmung des Sehorgans 365; Persistenz der optischen Gleichungen 366; Koeffizientensatz 366—367; Theorien der Umstimmung 367—369; 4. Zeitliche Verhältnisse der Reizerfolge 369; Wirkung kurzdauernder Reize 369—372; Ansteigen der Empfindung 372—373; Benhamsche Scheibe 373—374; 5. Überblick des Standes der theoretischen Fragen 374; Duplizitätstheorie 374; Theorien des trichromatischen Apparates 375—376; Bedeutung der optischen Gleichungen 376—378.*

# Verzeichnis einiger Abkürzungen,

welche in den Zitaten des Helmholtzschen Textes gebraucht sind.

Der Band des betreffenden Werkes ist jedesmal mit römischer Ziffer, die Seite mit arabischer bezeichnet; wo eine Zeitschrift mehrere Serien von Bänden umfaßt, ist die arabische Nummer der Serie, eingeklammert (. . . .), der römischen Zahl des Bandes vorausgesetzt worden.

1. Bericht über die zur Bekanntmachung geeigneten Verhandlungen der Königl. Preuß. Akademie der Wissenschaften zu Berlin. — Berl. Monatsber.
2. Abhandlungen der mathematisch-physikalischen Klasse der Königl. Bayr. Akademie der Wissenschaften. — Abh. d. Münch. Ak.
3. Abhandlungen der Königl. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. — Abh. d. Kön. Ges. zu Göttingen.
4. Göttingische gelehrte Anzeigen unter Aufsicht der Königl. Gesellschaft der Wissenschaften. — Götting. gel. Anz.
5. Abhandlungen der Leipziger Akademie. — Abh. d. Sächs. Ges. d. Wiss.
6. Berichte der Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig. — Leipz. Ber.
7. Annalen der Physik und Chemie, herausgegeben von G. Poggendorff. — Pogg. Ann.
8. Journal für reine und angewandte Mathematik, herausgegeben von A. L. Crelle. — Crelle's J.
9. Notizen aus dem Gebiete der Natur- und Heilkunde, herausgegeben von Froriep und Schleiden. — Fror. Not.

10. Polytechnisches Journal, herausgegeben von J. G. Dingler und E. M. Dingler. — Dingler's pol. J.
11. *Archives des sciences physiques et naturelles par* de la Rive, Marignac *et* Pictet. — *Arch. d. se. ph. et nat.* oder *Arch. de* Genève.
12. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. — Phil. Trans.*
13. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh. — Edinb. Trans.*
14. *Proceedings of the .... meeting of the British Association. — Rep. of Brit. Assoc.*
15. *The London, Edinburgh and Dublin philosophical Magazine and Journal of science, conducted by* Brewster, Taylor, Phillips, Kane. — *Phil. Mag.*
16. *The Edinburgh new philosophical Journal, cond. by* R. Jameson. — *Edinb. J.*
17. *The American Journal of science and arts, cond. by* Silliman, B. Silliman *and* Dana. — *Sillim. J.*
18. *Mémoires présentés à l'Académie Royale de Bruxelles. — Mém. de Brux.*
19. *Bulletin de l'Académie Royale des sciences et belles lettres de Bruxelles. — Bull. de Brux.*
20. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences de Paris. — C. R.*
21. *L'Institut, journal universel des sciences et des sociétés savantes en France et à l'étranger. — Inst.*
22. *Mémoires de l'Académie des Sciences à Paris. — Mém. de Paris.*
23. *Mémoires des savants étrangers, présentés à l'Académie des Sciences à Paris. — Mém. d. Sav. étr.*
24. *Annales de chimie et de physique par. MM.* Gay-Lussac, Arago, Ghevreul, Dumas, Pelouze, Boussingault *et* Regnault. — *Ann. de ch. et de ph.*
25. *Bulletin de la société d'encouragement pour l'industrie nationale. — Bull. de la Soc. d'ene.*
26. *Bulletin de la classe physico-mathématique de l'Académie impériale des Sciences de St. Pétersbourg. — Bull. de St. Pét.*
27. *Mémoires présentes à l'Académie impériale de St. Pétersbourg. — Mém. de Pétersb.*
28. Archiv für Ophthalmologie, herausgegeben von F. Arlt, F. C. Donders und A. v. Graefe. — Arch. f. Ophthalm.
29. Sitzungsberichte der Kaiserl. Akademie der Wissenschaften. Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse. — Wien. Ber.
30. *Cosmos, revue encyclopédique hebdomadaire des progrès des Scienees, redigée par* Moigno. Paris. — *Cosmos.*
31. Archiv für die holländischen Beiträge zur Natur- und Heilkunde, herausgegeben von F. C. Donders und W. Berlin. — Arch. für d. holl. Beitr.
32. Nederlandsch Archief voor Genees- en Natuurkunde, uitgegeven door F. C. Donders en W. Koster. — Nederl. Arch.
33. .... Jaarlijksch Verslag betrekkelijk de verpleging en het onderwijs in het Nederlandsch Gasthuis voor Ooglijders. — Jaarl. Versl. in het Nederl. Gasth.
34. Henle und Pfeuffer Zeitschrift für rationelle Medizin. — Henle u. Pfeuffer Zeitschr. oder Zeitschr. f. rat. Med.
35. Archiv für Anatomie, Physiologie und wissenschaftliche Medizin, herausgegeben früher von J. Müller, jetzt von C. B. Reichert und E. du Bois-Reymond. — J. Müllers Archiv oder Reichert und du Bois Archiv.
36. Jahresbericht des physikalischen Vereins zu Frankfurt a. M. — Jahresber. d. Frankf. Ver.
37. *Athenaeum, journal of litterature, science and the fine arts. — Athen.*

Tafel I ist zwischen Seite 54 und 55 einzufügen.

Zweiter Abschnitt.

# Die Lehre von den Gesichtsempfindungen.

## § 17. Von der Reizung des Sehnervenapparats.

Die Nervenapparate des menschlichen und tierischen Körpers werden durch Einwirkung äußerer Agentien verschiedener Art in einen veränderten Zustand versetzt, den man einerseits an ihnen durch physikalische Hilfsmittel, nämlich durch die Untersuchung ihrer elektromotorischen Wirksamkeit erkennen kann, und der sich andererseits durch Wirkungen zu erkennen gibt, welche die Nerven in anderen mit ihnen organisch verbundenen Teilen des Körpers hervorbringen. So verrät sich dieser veränderte Zustand einiger Nerven durch Zusammenziehungen der mit ihnen verbundenen Muskeln; diese werden motorische Nerven genannt. Andere erregen unter denselben Umständen Empfindungen in dem Gehirne, als dem körperlichen Organe des Bewußtseins, und heißen deshalb sensible Nerven. Bei den motorischen Nerven ist nun der auffälligste Erfolg der verschiedenartigsten äußeren Einwirkungen, des Zerrens, Quetschens, Zerschneidens, des Brennens, Anätzens, der elektrischen Durchströmungen, immer die Zusammenziehung des zugehörigen Muskels, welche nur quantitative Unterschiede der Stärke zeigt. Man faßt deshalb die genannten verschiedenartigen Einwirkungen in ihrem Verhältnisse zu den motorischen Nerven unter einen Namen, den der Reize, zusammen, indem man von ihren qualitativen Verschiedenheiten abstrahiert und sie nur nach der verschiedenen Stärke der Zuckungen, welche sie hervorbringen, quantitativ als stärker oder schwächer reizend voneinander unterscheidet. Den veränderten Zustand im Nerven selbst, welcher infolge der Einwirkung eines Reizes eintritt, nennt man die Reizung, und die Fähigkeit des Nerven, nach Einwirkung von Reizen Muskelzuckungen hervorzubringen, die Reizbarkeit. Diese Fähigkeit kann durch Absterben und mancherlei äußere Einwirkungen beeinträchtigt werden.

Bei den sensiblen Nerven läßt sich das Schema dieser Begriffe noch insofern wieder anwenden, als auch in ihnen die äußeren Einwirkungen, welche, auf einen motorischen Nerven angewendet, Zuckung hervorzubringen vermögen, wiederum alle eine andere Wirkung eigentümlicher Art, nämlich eine Empfindung hervorrufen, solange der Nerv noch nicht abgestorben und vom Gehirne getrennt ist. Aber allerdings tritt hier schon der wesentliche Unterschied ein, daß die Empfindung qualitative Unterschiede zeigt, entsprechend den qualitativen Unterschieden der Einwirkung. Indessen, wenn auch verschiedene Reize verschiedene Empfindungen hervorrufen, so sind die Wirkungen der Reize doch immer Empfindungen, also immer Wirkungen von einer sonst nicht vorkommenden, dem lebenden Körper eigentümlichen Art, und eben deshalb hat man den zuerst für die Verhältnisse der motorischen Nerven abstrahierten Begriff der Reize und der Reizung auch auf die der sensiblen Nerven übertragen, und man nennt deshalb ebenso die äußeren Einwirkungen, welche auf lebende

sensible Nerven angewendet die Entstehung von Empfindungen veranlassen, Reize, die im Nerven eingetretene Veränderung selbst die Reizung.

Der Zustand der Reizung, welcher an jeder Stelle einer Nervenfaser durch Einwirkung von Reizen eingeleitet werden kann, pflanzt sich stets auch auf alle anderen Teile der Nervenfaser fort, und gibt sich auch in diesen teils durch die veränderten elektromotorischen Wirkungen zu erkennen, teils durch seinen Einfluß auf die anderen organischen Gebilde, Muskeln, Gehirn, Drüsen usw., mit denen der Nerv verbunden ist, indem Zusammenziehung des Muskels, oder Empfindung, oder vermehrte Absonderung der Drüse eintritt. Nur wo eingreifende Veränderungen der Struktur des Nerven durch mechanische oder chemische Eingriffe, durch Gerinnung des Inhalts der Nervenfasern beim Absterben eingetreten sind, findet die Fortleitung der Reizung ein Hindernis. Jeder Stelle einer unverletzten Nervenfaser kommt deshalb nicht bloß Reizbarkeit, d. h. die Fähigkeit, in Reizung versetzt zu werden, sondern auch Leitungsfähigkeit für die Reizung zu. Eine Trennung beider Fähigkeiten ist noch nicht beobachtet worden. Übrigens sind bisher noch keine Unterschiede in der Struktur und Funktion der sensiblen und motorischen Fasern bekannt, welche nicht von ihrer verschiedenen Verbindung mit anderen organischen Systemen hergeleitet werden könnten. Die Fasern selbst scheinen nur die Rolle indifferenter leitender Fäden zu spielen, die, je nachdem sie mit einem Muskel oder mit empfindenden Gehirnteilen organisch verbunden sind, zu motorischen oder sensiblen Nerven werden.

Die Empfindungen des Menschen zerfallen ihrer Qualität nach in fünf Gruppen, welche den sogenannten fünf Sinnen entsprechen, in der Weise, daß nur die Qualitäten derjenigen Empfindungen untereinander vergleichbar sind, welche dem Qualitätenkreise desselben Sinnes, nicht aber solche, welche zwei verschiedenen Sinnen angehören. So können wir z. B. zwei verschiedene Empfindungen, die dem Gesichtssinne angehören, nach Lichtintensität und Farbe vergleichen, aber keine von ihnen mit einer Tonempfindung oder Geruchsempfindung.

Die physiologische Erfahrung hat, soweit Prüfung möglich war, gefunden, daß durch Reizung jeder einzelnen sensiblen Nervenfaser nur solche Empfindungen entstehen können, welche dem Qualitätenkreise eines einzigen bestimmten Sinnes angehören, und daß jeder Reiz, welcher diese Nervenfaser überhaupt zu erregen vermag, nur Empfindungen dieses besonderen Kreises hervorruft. Vollständig experimentell beweisen läßt sich der Satz nur für solche Nervenfasern, die in besonderen Nervenstämmen, getrennt von allen Fasern, die anderen Sinnen angehören, zusammenliegen, wie die des Gesichtssinnes im *Nervus opticus*, die des Gehörs im *Nervus acusticus*, die des Geruchs im *Nervus olfactorius*, die des Tastsinns in den hinteren Rückenmarkswurzeln. Läßt man auf diese Nervenstämme verschiedene Reizmittel einwirken, so entstehen zwar verschiedene Empfindungen, aber nur Empfindungen, die dem Qualitätenkreise des betreffenden Sinnes angehören. Für solche sensible Nervenfasern dagegen, die mit Fasern anderer Art in demselben Stamme verlaufen, wie die Geschmacksnerven mit Tastnerven der Zunge im *Nervus glossopharyngeus* und *lingualis* vereinigt sind, läßt sich dasselbe Verhältnis wenigstens daraus wahrscheinlich machen, daß in Krankheitszuständen zuweilen isoliert Lähmung der Geschmacksempfindungen allein ohne Lähmung der Tastempfindungen oder umgekehrt vorkommt, und auch daraus, daß alle

anderen Tastnerven der Fähigkeit, Geschmacksempfindungen zu vermitteln, ermangeln.

Dem Kreise des Gesichtssinns gehören die Lichtempfindungen an, welche alle unter sich in bezug auf Lichtstärke und Farbe vergleichbar sind. Denjenigen Teil der Nervenmasse des Körpers, durch dessen Reizung dergleichen Empfindungen entstehen können, nennen wir nach J. Müller die Sehsinnsubstanz, oder auch wohl den Sehnervenapparat. Dazu gehört die Netzhaut, der Sehnerv und ein noch nicht genau zu begrenzender Teil des Gehirns, in welchen die Wurzelfaserungen des Sehnerven eintreten. Kein anderer Nervenapparat des Körpers kann Lichtempfindung, d. h. eine Empfindung von derselben Qualität wie der Sehnervenapparat vermitteln, obgleich die leuchtenden Ätherschwingungen auch durch die Tastnerven wahrgenommen werden können, aber freilich in einer ganz anderen Empfindungsqualität, nämlich als Empfindung strahlender Wärme. Es findet hier dasselbe statt, wie bei den Luftschwingungen, welche der Hörnerv als Ton empfindet, während sie gleichzeitig in der Haut die Tastempfindung des Schwirrens erregen, dasselbe wie bei dem Essig, den die Zunge als sauer schmeckt, und der in einer entblößten Hautstelle oder auf einer zarten Schleimhaut, wie die Bindehaut des Auges ist, durch eine Tastempfindung, nämlich durch schmerzhaftes Brennen, sich bemerklich macht.

Andererseits können nicht bloß die leuchtenden Ätherschwingungen den Sehnervenapparat erregen, sondern auch mannigfache andere Reizmittel, namentlich mechanische Einwirkungen und elektrische Ströme, welche ja auch alle anderen Nervenapparate des Körpers in den Zustand von Reizung zu versetzen vermögen. Wenn aber diese Reize den Sehnerven oder die Netzhaut treffen, bringen sie immer nur Gesichtsempfindungen hervor, nicht Gehörs- oder Geruchsempfindungen, und wenn sie etwa gleichzeitig Tastempfindungen erregen, so müssen wir voraussetzen, daß dies geschieht, weil sich im Auge und vielleicht selbst in der Masse des Sehnerven, wie in allen inneren Teilen des Körpers, auch besondere Tastnerven verbreiten. Diese Tastempfindungen, welche durch Einwirkung von Druck oder Elektrizität auf das Auge entstehen, unterscheiden sich übrigens noch dadurch von den gleichzeitig erregten Lichtempfindungen, daß jene am Orte der Reizung wahrgenommen werden, letztere dagegen von der Vorstellung als helle Objekte in das Gesichtsfeld verlegt werden. Wir kommen darauf bei der genaueren Beschreibung der mechanischen Reizung des Auges noch einmal zurück.

Da es sich mit den übrigen Sinnesnerven ebenso verhält, so geht daraus hervor, daß die Qualität der sinnlichen Empfindung hauptsächlich von der eigentümlichen Beschaffenheit des Nervenapparats abhängt, erst in zweiter Linie von der Beschaffenheit des wahrgenommenen Objekts. Zu dem Qualitätenkreise welches Sinnes die entstehende Empfindung gehört, hängt sogar gar nicht von dem äußeren Objekte, sondern ausschließlich von der Art des getroffenen Nerven ab. Welche besondere Empfindung aus dem betreffenden Qualitätenkreise hervorgerufen wird, erst dies hängt auch von der Natur des äußeren Objektes ab, welches die Empfindung erregt. Ob uns die Sonnenstrahlen als Licht- oder Wärmestrahlung erscheinen, hängt nur davon ab, ob wir sie durch den Sehnerven oder durch die Hautnerven empfinden; ob sie aber als rotes oder blaues, schwaches oder starkes Licht, sengende oder milde Wärme erscheinen hängt gleichzeitig von der Art der Strahlen, wie von dem Zustande des Nervenapparates ab. Die Qualität der Sinnesempfindung ist also keineswegs identisch

mit der Qualität des Objekts, durch welche sie hervorgerufen wird, sondern sie ist in physischer Beziehung nur eine Wirkung der äußeren Qualität auf einen besonderen Nervenapparat, und für unsere Vorstellungen ist die Qualität der Empfindung gleichsam nur ein Symbol, ein Erkennungszeichen für die objektive Qualität.

Das erste und hauptsächlichste Reizmittel des Sehnerven ist das objektive Licht. Ich nenne es das erste und hauptsächlichste, weil es bei weitem häufiger und anhaltender auf den Sehnerven einwirkt, als andere Reize, und weil demgemäß auch fast nur die durch objektives Licht hervorgerufenen Empfindungen des Sehnervenapparats zur Wahrnehmung äußerer Objekte verwendet werden. Eine besondere, spezifische Beziehung oder Homogeneität zwischen dem objektiven Lichte und dem Nervenagens des Sehnerven, wie sie von älteren Philosophen und Physiologen meist vorausgesetzt wurde, brauchen wir deshalb nicht anzunehmen. Denn weder ist der Sehnerv der einzige Nerv, welcher durch objektives Licht gereizt wird — auch die Hautnerven können es werden —, noch ist das objektive Licht das einzige Reizmittel des Sehnerven. Daß es das häufigste, und deshalb wichtigste ist, erklärt sich einfach aus der geschützten Lage des Sehnerven und der Netzhaut, die dem Lichte sehr leicht, mechanischen Eindrücken und elektrischen Strömungen viel schwerer zugänglich sind. Diese überwiegende Häufigkeit und Wichtigkeit der Reizung durch objektives Licht hat nun auch die Menschen bestimmt, denjenigen Teil der Ätherschwingungen, welcher Lichtempfindung zu erregen imstande ist, mit dem Namen Licht zu belegen, welcher eigentlich nur der dadurch erregten Empfindung zukommen sollte. Man schied die Sonnenstrahlen in Sonnenlicht und Sonnenwärme, nach den beiden Empfindungsweisen, welche sie zu erregen imstande sind. Solange die Menschen über die Natur ihrer Sinnesempfindungen nicht weiter nachgedacht hatten, mußten sie geneigt sein, die Empfindungsqualitäten unmittelbar auf die äußeren Dinge zu übertragen, und so in den Sonnenstrahlen zwei, den zwei Empfindungen entsprechende Objekte vorauszusetzen. Man wußte außerdem zunächst über die Sonnenstrahlen weiter nichts, als was die Empfindung aussagte, und man beobachtete neben solchen Strahlungen, bei denen, wie in den Sonnenstrahlen, die schneller schwingenden Wellenzüge überwiegen, die das Auge viel stärker affizieren als die Haut, andere, in denen die langsameren Oszillationen überwiegen, und die die Haut kräftig, das Auge schwach oder gar nicht affizieren, so daß auch objektiv eine Trennung beider Agentien vorzukommen schien. Erst in der neuesten Zeit hat eine sorgfältige Untersuchung der von unseren Nervenapparaten unabhängigen Eigenschaften der leuchtenden und nicht leuchtenden Wärmestrahlen die Physiker überzeugt, daß zwischen ihnen kein anderer Unterschied als der der Schwingungsdauer besteht, und hat dadurch die Physik von dem Einflusse, den die Sinnesempfindungen in diesem Falle solange unberechtigter Weise ausgeübt hatten, befreit. Die nähere Besprechung des objektiven Lichtes als Reizmittel der Netzhaut bleibt den nächstfolgenden Paragraphen vorbehalten.

Die Erscheinungen bei mechanischer Reizung des Sehnervenapparates sind nach der Ausdehnung der Reizung verschieden. Bei einem plötzlichen Schlag oder Stoß auf das Auge entsteht ein blitzähnlich erscheinender und wieder verschwindender, oft sehr heller Lichtschein über das ganze Gesichtsfeld hin. Älteren irrtümlichen Ansichten dieser Erscheinung gegenüber mag hier hervorgehoben werden, daß, wenn dies im Dunkeln geschieht, ein anderer

Beobachter dabei in dem Auge des Getroffenen keine Spur von objektivem Lichte erblickt, so lebhaft auch der subjektive Blitz sein mag, und daß es ebenso wenig möglich ist, durch diese subjektive Erleuchtung des dunkeln Gesichtsfeldes irgend etwas von den wirklichen Objekten der Außenwelt zu erkennen[1].

Besser untersuchen läßt sich die Wirkung beschränkten Druckes. Wenn man irgendwo am Rande der Augenhöhle mit einer stumpfen Spitze, z. B. der des Fingernagels, gegen den Augapfel drückt, so entsteht eine Lichterscheinung, Druckbild oder Phosphen, und zwar an derjenigen Stelle des Gesichtsfeldes, welche der gedrückten Stelle der Netzhaut entspricht. Wenn man oben drückt, erscheint also der helle Fleck an der unteren Grenze des Gesichtsfeldes, drückt man am äußeren Augenwinkel, so erscheint er am Nasenrücken, drückt man unten oder innen, so erscheint er oben oder außen. Wenn der drückende Körper nicht breit ist, hat die Erscheinung gewöhnlich ein helles Zentrum, umgeben von einem dunkeln und einem hellen Kreise. Ich finde, daß sie am hellsten ist, wenn der Druck etwa den Äquatorialumfang des Auges trifft, wo die Sclerotica am dünnsten ist. Das Druckbild erscheint dann an der Grenze des dunkeln Gesichtsfeldes als eine helle Bogenlinie, etwa halbkreisförmig. Es ist unter diesen Umständen ziemlich weit von dem Gesichtspunkte (dem am genauesten gesehenen Punkte des Gesichtsfeldes, welcher dem gelben Fleck entspricht) entfernt, und fällt deshalb, wenn man die Augen öffnet, mit dem Bilde äußerer Gegenstände zusammen, die nur undeutlich wahrgenommen werden. Doch erkennt man bei einiger Übung im indirekten Sehen, namentlich wenn sich auffallend helle Gegenstände am scheinbaren Orte des Druckbildes befinden, daß die Objekte in der Gegend des Druckbildes Verzerrungen (wegen der Einbiegung der Sclerotica und Retina) erleiden, und oft auch stellenweise verdunkelt werden. Man kann aber das Druckbild auch dem Gesichtspunkte näher bringen, wenn man das Auge stark nach innen wendet, während man außen drückt, oder stark nach außen wendet, während man am inneren Augenwinkel drückt, dabei wird es ein wenig schwächer, weil die hintere Fläche der Sclerotica dem Drucke größeren Widerstand leistet. Einzelnen Personen (z. B. Thomas Young) gelingt es auch wohl durch Druck am äußeren Augenwinkel das Druckbildchen bis an die Stelle des direkten Sehens vorzubringen. Mir gelingt dies nicht, doch kommt das Druckbildchen dem Gesichtspunkte so nahe, daß ich wahrnehmen kann, wie in seinem Zentrum die Bilder der äußeren Gegenstände verschwinden. In Fig. 1, Taf. I ist das Druckbild dargestellt, wie es mir erscheint, wenn ich zwischen Auge und Nase ein weißes Papierblatt gegen das Gesicht stelle, das Auge möglichst nach der inneren Seite wende, und mit einer stumpfen Spitze am äußeren Rande der Augenhöhle drücke. *N* bezeichnet die Nasenseite; das Druckbild besteht aus einem dunkeln Flecke, von einem hellen senkrechten Streifen durchzogen. Von dem dunkeln Flecke geht, wenn man in richtiger Höhe drückt, ein horizontaler Fortsatz aus, dessen Spitze bei *a* den Fixationspunkt berührt, und außerdem ist in der Gegend des Sehnerveneintritts ein unbestimmt gezeichneter Schatten *b* sichtbar. Wie man die Stelle des Sehnerveneintritts im Gesichtsfelde erkennen kann, wird in § 18

[1] Über einen gerichtlichen Fall, wo jemand im Finstern einen Schlag auf das Auge bekommen und bei dem dadurch erregten Lichtschein den Angreifer erkannt haben will, s. J. Müller, Archiv für Anat. 1834. S. 140.

auseinandergesetzt werden. Ein System feiner paralleler bogenförmiger Linien zwischen dem dunkeln Druckbilde und dem Gesichtspunkte hat schon Purkinje bemerkt und abgebildet. Ich sehe sie nicht so ausgebildet, wie er sie abbildet, am besten, wenn die Helligkeit der entsprechenden Stelle des Gesichtsfeldes groß ist.

Im dunkeln Gesichtsfelde dagegen erscheint eine helle gelbliche Kreisfläche, in deren Innerem sich zuweilen ein dunkler Fleck oder ein dunkler Ring abzeichnet. Ein schwaches Licht erscheint auch an der Eintrittsstelle des Sehnerven, so daß die Erscheinung ungefähr der Fig. 1, Taf. I entspricht, wenn man Hell und Dunkel vertauscht denkt. Nur den Fortsatz zum gelben Fleck hin habe ich im dunkeln Felde nicht sehen können.

Wieder anders sind die Erscheinungen, wenn man längere Zeit einen mäßigen Druck gleichmäßig auf den Augapfel wirken läßt, indem man ihn von vorn her entweder mit den weicheren Stellen der Handwurzel oder mit den zusammengelegten Fingerspitzen einer Hand drückt. Nach kurzer Zeit treten dann sehr glänzende und wechselnde lichte Figuren im Gesichtsfelde auf, die ein wunderliches, phantastisches Spiel vollführen und oft den glänzendsten kaleidoskopischen Darstellungen, wie sie in neuerer Zeit mit Hilfe des elektrischen Lichtes entworfen werden, ähnlich sind. Purkinje hat diese Erscheinungen sehr genau verfolgt, beschrieben und abgebildet; sie scheinen in seinen Augen eine große Regelmäßigkeit gehabt zu haben. Meist zeigten sich auf einem mit feinen Vierecken regelmäßig gemusterten Grunde entweder achtstrahlige sternförmige Figuren, oder dunkle oder helle rhombische Flächen, deren Diagonalen vertikal und horizontal gerichtet waren, und die von abwechselnd hellen und dunkeln Bändern umgeben waren. Bei mir selbst finde ich keine solche Regelmäßigkeit der Figuren; der Grund des Gesichtsfeldes ist meist anfangs fein gemustert, aber in den mannigfaltigsten Weisen und mit den verschiedensten Farben, sehr oft als wären sehr viele feine Blättchen oder Moosstengel ausgestreut, ein anderes Mal erscheinen allerlei Vierecke, hell braungelb, mit dunkeln griechischen Linienmustern, zuletzt entwickeln sich meist auf braungelbem Grunde dunkle Liniensysteme, die zuweilen sehr verwickelte sternförmige Figuren, zuweilen nur einen unentwirrbaren labyrinthischen Knäuel bilden, und in fortdauernder schwankender oder strömender Bewegung begriffen sind. Außerdem pflegen sich sehr helle blaue oder rote Funken in einzelnen Stellen des Feldes längere Zeit zu erhalten. Läßt man mit dem Drucke nach, wenn die Erscheinung in größtem Glanze entwickelt ist, ohne daß äußeres Licht in das Auge dringt, so dauert das Spiel ähnlicher Figuren noch eine Zeitlang fort, und verschwindet, allmählich dunkler werdend. Öffnet man dagegen das Auge, indem man mit dem Drucke nachläßt, gegen helle äußere Objekte, so herrscht im ersten Momente Dunkelheit, dann werden allmählich in der Mitte des Gesichtsfelds einzelne helle Objekte, aber mit intensivem Glanze sichtbar. So sehe ich z. B. einzelne weiße Papierblätter in ihrer wahren Gestalt in blendender Helligkeit auftauchen, auf ihnen aber noch Reste des vorher vorhandenen Figurenmusters sichtbar, dessen dunkle Teile hier hell erscheinen. Allmählich verliert sich dann die abnorme Helligkeit in demselben Maße, wie es die Druckbilder vor dem geschlossenen Auge tun, aber noch längere Zeit unterscheidet sich das gedrückte Auge von dem anderen dadurch, daß ihm das Gesichtsfeld mehr violett erscheint, dem ungepreßten Auge dagegen gelblich. Vierordt und Laiblin berichten, bei anhaltendem Druck auf das Auge die Verästelungen der

Gefäße der Netzhaut rot auf dunklem Grunde gesehen haben, was ich bisher vergebens versucht habe. Außerdem erscheinen Vierordt die Retinalgefäße dabei häufig in einer bläulich glänzenden Färbung. Ferner haben sie, wie auch früher Steinbach und Purkinje, ein Gefäßnetz mit strömendem Inhalte gesehen. Letzterer erklärte es für das venöse Adernetz der Retina; Laiblin schließt aus seinen Beobachtungen, da es neben den vorher erwähnten Retinalgefäßen sichtbar war, daß die wahrgenommene Zirkulation „einer anderen gefäßreicheren mehr nach außen gelegenen Retinalschicht" angehören müsse. Meissner und mir selbst ist es nie gelungen, unter den Druckbildern des Auges außer zuweilen aufblitzenden Zügen der bekannten Aderfigur der Netzhaut etwas einem Gefäßnetze Ähnliches zu sehen, und wenn ich auch als Schlußstadium fast immer labyrinthische Liniensysteme in strömender Bewegung sehe, so ist deren Anordnung doch mit keinem Gefäßnetze zu vergleichen.* Zu bemerken ist übrigens für die Theorie dieser Erscheinungen, daß nach den von Donders mit dem Augenspiegel ausgeführten Untersuchungen durch Druck auf das Auge allerdings Veränderungen in den Netzhautgefäßen eintreten, indem zuerst die Venen zu pulsieren anfangen und später das Blut aus ihnen sich ganz entleert. Diese veränderten Zustände der Gefäße mögen von manchen Augen empfunden werden können. Sonst möchte ich die unruhigen und wechselnden Bilder, welche durch anhaltenden Druck im Auge erzeugt werden, mit dem Gefühle des Ameisenlaufens vergleichen, welches in eingeschlafenen Gliedern, deren Nervenstämme längere Zeit einem Drucke ausgesetzt gewesen sind, eintritt. Wenn wir, schief auf einer Hüfte sitzend, den Hüftnerven drücken, verliert bald der Fuß und Unterschenkel die Fähigkeit, Berührung äußerer Objekte zu empfinden; dagegen tritt ein heftiges Kribbeln in den taub gewordenen Teilen der Haut ein, welches in ähnlicher Weise schnell wechselnde Erregungen der empfindenden Nervenfasern verrät, wie sie bei dem entsprechenden Zustande der Netzhaut sich durch die wechselnden feinen Figuren im Gesichtsfelde zeigen. Wenn dann der Druck nachläßt, sind bei wiederkehrender Fähigkeit, äußere Objekte wahrzunehmen, die ersten Berührungen des Fußes oft schmerzhaft, während das Auge äußere Gegenstände in blendendem Lichte wahrnimmt.

Ein anderes Phänomen, was einer mechanischen Reizung der Netzhaut anzugehören scheint, sind gewisse lichte Flecke, welche empfindliche Augen im dunkeln Gesichtsfelde sehen, wenn sie eine schnelle Bewegung des Auges vollführen. In Fig. 2, Taf. I sind sie abgebildet, wie sie im gemeinschaftlichen Gesichtsfelde beider Augen mir erscheinen, wenn die Augen in Richtung des Pfeils nach links hin bewegt worden sind. Das mit *L* bezeichnete gehört dem linken, das andere dem rechten Auge an. Die Erscheinung ist in dem nach einwärts bewegten Auge, hier dem rechten, weniger entwickelt als in dem nach auswärts bewegten. Ich selbst sehe sie nur des Morgens gleich nach dem Erwachen, oder bei Unwohlsein; andere Beobachter, wie Purkinje

* Bei mir (N.) tritt ein dichtes Netz heller Linien auf dunklem Grunde regelmäßig dann auf, wenn ich ein Auge für mindestens 20 Minuten annähernd lichtdicht verschließe, gleichviel ob unter Druck oder nicht. In den hellen Linien ist ein schnelles Strömen oder Flimmern deutlich erkennbar. Während der ersten Minuten des Lichtabschlusses fehlt die Erscheinung, erst allmählich entwickelt sie sich. Nach einer halben oder ganzen Stunde wird das Phänomen so deutlich, daß es beispielsweise beim Lesen mit dem freien Auge störend wirkt. Bei Verschluß beider Augen finde ich jenes Strömungsbild höchstens angedeutet. Bemerkenswert ist, daß das foveale Gebiet nicht frei bleibt, sondern die Strömung besonders deutlich zeigt.

und Czermak[1], sehen sie zu jeder Tageszeit im Dunkeln als feurige Ringe oder Halbringe. Ihre Entfernung vom Gesichtspunkte ist eine solche, daß ein Beobachter, der die später zu beschreibenden Phänomene des sogenannten blinden Flecks gut kennt, daraus schließen kann, daß sie der Eintrittsstelle des Sehnerven angehören. Sie entstehen also wahrscheinlich dadurch, daß bei schnellen Bewegungen des Auges der Sehnerv vom Augapfel mit in Bewegung gesetzt und an seiner Eintrittsstelle gezerrt wird. Purkinje[2] sieht an der Eintrittsstelle des Sehnerven auch dauernd einen lichten Ring, wenn er das Auge stark nach innen wendet, nach der Mitte des Gesichtsfeldes umgeben von konzentrischen hellen Streifen, während bei mir die Erscheinungen nur immer momentan auftauchen. Stellt man den Versuch mit offenem Auge vor einer weißen gleichmäßig beleuchteten Fläche an, so erscheinen bei starker Drehung des Auges dunkle Flecken dem Sehnerveneintritt entsprechend, die, wie Czermak bemerkt, beim Drehen nach innen leichter eintreten, und eine regelmäßigere Kreisform annehmen als beim Drehen nach außen. In dem rötlichen Felde, welches die geschlossenen und von außen beleuchteten Augenlider geben, erscheinen diese dunkeln Flecke blau. Ich selbst erkenne übrigens auch in den dunkeln Flecken Spuren derselben Ährenform, welche die Lichterscheinung im dunkeln Felde zeigt, während Czermak hervorhebt, daß bei ihm letzte Erscheinung nicht das negative Abbild der ersteren sei. Auch hier scheinen also die gereizten Nervenfasern ihre Empfindlichkeit gegen äußere Reize durch die Zerrung zu verlieren. Als gereizt muß man in diesem Falle wohl die Fasern betrachten, die in unmittelbarer Nähe des Sehnerven enden, da die Eintrittsstelle des Sehnerven selbst gegen Lichtreiz unempfindlich ist, und daher nicht zu erwarten ist, daß dort irgendwelche der Lichtempfindung fähige Fasern enden, in deren Folge eine Lichtempfindung gerade an diese Stelle des Gesichtsfelds verlegt werden könnte. Endlich ist hierher auch wohl das von Purkinje[3] und Czermak[4] beobachtete Akkommodationsphosphen zu rechnen. Wenn man im Finstern die Augen für das Sehen in nächster Nähe einrichtet und dann plötzlich wieder für die Ferne akkommodiert, so bemerkt man nahe an der Peripherie des Gesichtsfeldes einen ziemlich schmalen feurigen Saum, welcher, ringförmig in sich selbst zurücklaufend, in dem Momente aufblitzt, wo man mit der fühlbaren Anstrengung fürs Nahesehen nachläßt. Purkinje sah die Erscheinung auch bei plötzlichem Nachlaß gleichmäßigen Drucks auf das Auge. Ich selbst habe sie bisher noch nicht sehen können. Czermak erklärt sie dadurch, daß im Momente, wo der Zug des Ciliarmuskels nachläßt, die erschlaffte Zonula sich wieder spannt, während die Linse noch in radialer Richtung verkürzt ist und dadurch eine plötzliche Zerrung des äußersten Randes der Netzhaut eintritt, dessen Ende mit der Zonula verklebt ist.

Akkommodiere ich stark für die Nähe, während das Auge nach einer gleichmäßig erleuchteten weißen Fläche gekehrt ist, so entsteht im Fixationspunkte ein schattiger Fleck, am Rande braun abschattiert, von dem auch wohl braune oder hell violette Streifen sich nach verschiedenen Seiten hinziehen. Dann pflegt sich das Gesichtsfeld schnell zu verdunkeln, während netzförmige

[1] Physiologische Studien. Abteilung I. § 5. S. 42 u. Abt. II. S. 32. — Wiener Sitzungsber. XII. S. 322 u. XV. 454.

[2] Beiträge zur Kenntnis des Sehens. S. 78.

[3] Zur Physiologie der Sinne. Bd. I. 126. II. 115.

[4] Wiener Sitzungsber. XXVII. 78.

Zeichnungen und Teile der Aderfigur, dunkel auf weißem Grunde darin sichtbar werden. Bei Nachlaß der Akkommodation für die Nähe schwindet alles. Purkinje beschreibt den braunen Fleck, sah aber dessen Zentrum weiß. Hierher gehört auch ein elliptischer gefleckter Lichtschein, den Purkinje[1] bei dunklem Gesichtsfelde erblickte, wenn er mit dem Druck der Augenlider plötzlich nachließ. Damit die Erscheinung zustande kam, war es nötig, daß kurz vorher äußeres Licht auf das Auge gewirkt hat. Ich selbst kann sie nicht sehen.

Durchschneidung und Zerrung des bloßgelegten Sehnerven bei Hunden ruft keine Schmerzensäußerungen hervor, während die gleichen Verletzungen ebenso starker Hautnervenstämme die allerheftigsten Schmerzen erregen. Beim Menschen wird durch krebsige Entartungen des Auges zuweilen die Exstirpation des Augapfels nötig. Wenn der Sehnerv in solchen Fällen noch nicht selbst entartet ist, werden im Augenblicke der Durchschneidung des Sehnerven große Lichtmassen gesehen[2], während die Kranken dabei etwas größeren Schmerz haben, als bei der Durchschneidung der übrigen benachbarten Teile. Daß die Durchschneidung des Sehnerven ganz ohne solchen Schmerz, wie ihn die Tastnerven empfinden, vor sich gehen sollte, dürfen wir nicht erwarten, da wenigstens die übrigen größeren Nervenstämme ihre *Nervi nervorum* haben, besondere empfindende Fasern, die ihnen ebensogut zukommen, wie allen übrigen inneren Teilen des Körpers, und welche ihre örtliche Empfindlichkeit vermitteln. Bei den vorderen Wurzeln der Rückenmarksnerven, durch welche nur motorische Fasern aus dem Rückenmarke austreten, kann man nachweisen, daß solche *Nervi nervorum* ihnen aus den hinteren sensiblen Wurzeln zugeschickt werden. Wenn der *Nervus ulnaris* hinter dem inneren Ellenbogenhöcker gestoßen wird, gibt sich die Reizung der durchlaufenden Fasern des Nerven durch einen Schmerz kund, der scheinbar im Verbreitungsbezirke des Nerven am fünften und vierten Finger stattfindet, während ein anderer Schmerz an der gestoßenen Stelle selbst, welcher unangenehmer ist, als wenn nur die Haut getroffen wäre, den Nerven des Nervenstammes zugeschrieben werden muß. Ebenso fühlen wir, indem wir am äußeren Augenwinkel den Augapfel drücken, örtlich den Schmerz des Druckes mittels der empfindenden Nerven dieser Stelle, und sehen einen Lichtschein, den wir in die Gegend des Nasenrückens verlegen. Etwas Ähnliches kann bei der Reizung des Sehnervenstammes vorkommen.

Daß der Sehnerv und die Netzhaut, welche fähig sind, ein so feines Agens, wie das Licht ist, zu empfinden, gegen die gröbste mechanische Mißhandlung ziemlich unempfindlich bleiben, d. h. keinen in das Gebiet der Tastempfindungen gehörigen Schmerz empfinden, erschien früher als ein wunderbares Paradoxon. Die Lösung ergibt sich einfach daraus, daß die Qualität aller Empfindungen des Sehnerven in den Kreis der Lichtempfindungen gehört. Es fehlt ihm also nicht die Empfindlichkeit, aber die Form der Empfindung ist eine andere.

Sehr mannigfaltig ist ferner das Gebiet der Lichtempfindungen aus inneren Ursachen. Es gehören dahin eine Menge von Lichterscheinungen im Gesichtsfelde, welche in allerlei Krankheitszuständen des Auges oder des ganzen Körpers auftreten, bald über das ganze Feld ergossen, bald räumlich begrenzt, und im letzteren Falle bald in Form unregelmäßiger Flecken, bald als Phantasmen, Menschen, Tiere usw. nachahmend. Vielfach mögen dabei mechanische Ur-

[1] Zur Physiologie der Sinne. II. 78.

[2] Tourtual in J. Müller, Handbuch der Physiologie. Koblenz 1840. Bd. II. S. 259.

sachen mitwirken, vermehrter Druck des Blutes in den Gefäßen oder der Augenflüssigkeiten; so sieht man beim Nachlasse gleichmäßigen Drucks auf den Augapfel häufig Stücke der Gefäßfigur aufblitzen, oder sieht nach heftigen Anstrengungen teils einzelne pulsierende Stellen, teils größere Stücke der Gefäßfigur[1]. In anderen Fällen mag es eine Art chemischer Reizung durch veränderte Zusammensetzung des Blutes sein, z. B. im Falle narkotischer Vergiftungen. Endlich sind manche von diesen Erscheinungen auch wohl zu erklären durch Ausbreitung des Reizungszustandes innerhalb der Zentralteile von anderen Teilen des Nervensystems auf die Wurzeln des Sehnerven. Übertragung der Reizung von einem ursprünglich erregten empfindenden Nerven auf einen anderen solchen Nerven, der von keinem äußeren Einflusse getroffen ist, nennen wir Mitempfindung. So erregt der Anblick großer heller Flächen, z. B. von der Sonne beleuchteter Schneefelder, bei vielen Personen gleichzeitig Kitzel in der Nase, oder das Hören gewisser kratzender und quiekender Töne ein Kältegefühl, welches längs des Rückens herabläuft. Dergleichen Mitempfindungen scheinen auch im Sehnervenapparate vorkommen zu können, wenn andere Empfindungsnerven erregt sind, z. B. die des Darms durch Eingeweidewürmer bei Kindern oder durch aufgehäufte Darmkontenta, Blutstockungen und andere Abnormitäten bei Hypochondern. Eigentliche Phantasmen, d. h. Lichtbilder, welche das Ansehen bekannter Objekte der Außenwelt an sich tragen, scheinen durch eine ähnliche Übertragung des Erregungszustandes von den bei der Bildung von Vorstellungen tätigen Teilen des Gehirns auf den Sehnervenapparat entstehen zu können. Es sind dergleichen gesehen worden von vielen Beobachtern, welche sich, während sie es sahen, der subjektiven Natur des Phantasma durchaus bewußt waren[2]. Einige, wie Goethe und J. Müller, konnten sogar zu jeder Zeit, wenn sie lange in das dunkle Gesichtsfeld der geschlossenen Augen hineinsahen, dergleichen Erscheinungen sehen.

Übrigens ist das Gesichtsfeld auch des gesunden Menschen zu keiner Zeit ganz frei von solchen Erscheinungen, die man das Lichtchaos, den Lichtstaub des dunklen Gesichtsfeldes genannt hat; da es bei manchen Erscheinungen, z. B. den Nachbildern, eine wichtige Rolle spielt, wollen wir es das Eigenlicht der Netzhaut nennen. Wenn man die Augen schließt und das dunkle Gesichtsfeld aufmerksam betrachtet, wird man anfangs häufig noch Nachbilder der vorher gesehenen äußeren Objekte wahrnehmen (über deren Entstehung siehe unten § 24 und 25), später ein unregelmäßiges schwach beleuchtetes Feld mit mannigfach sich wandelnden Lichtflecken, die häufig Gefäßverästelungen oder ausgestreuten Moosstielchen und Blättern ähnlich sind, und bei manchen Beobachtern auch in Phantasmen übergehen. Eine ziemlich häufige Form dieser Lichterscheinungen scheint die zu sein, welche Goethe[3] wandelnde Nebelstreifen nennt. Purkinje beschreibt sie als „breite mehr oder weniger gekrümmte Bänder mit zwischenliegenden schwarzen Intervallen, die entweder als konzentrische Kreise gegen den Mittelpunkt des Sehfeldes sich bewegen, und dort sich verlieren, oder als wandelnde Bögen an ihm sich brechen, oder als krumme Radien um ihn im Kreise sich bewegen. Ihre Bewegung ist

[1] Purkinje, Zur Physiologie der Sinne. I. 134. II. 115. 118. — Subjektive Erscheinungen nach Wirkung der Digitalis II. 120.

[2] Fälle der Art sind zusammengestellt bei J. Müller, Über phantastische Gesichtserscheinungen. Koblenz 1826. S. 20.

[3] Farbenlehre. Abt. I. § 96.

langsam, so daß es gewöhnlich acht Sekunden braucht, bis ein solches Band den Weg vollendet und völlig verschwunden ist". Ich selbst sehe sie meist wie zwei Systeme kreisförmiger Wellen, die langsam gegen ihre Mittelpunkte zu beiden Seiten des Gesichtspunktes zusammenlaufen. Die Lage der Mittelpunkte schien mir den Eintrittsstellen der beiden Sehnerven zu entsprechen; die Bewegung fällt mit der der Respirationsbewegungen zusammen. Purkinje hatte ein schwächeres Auge und sah nur mit dem rechten Auge ein solches System von Nebelstreifen. Übrigens wird auch der Grund des Gesichtsfeldes, auf dem sich diese Erscheinungen entwerfen, nie ganz dunkel, man sieht im Gegenteile abwechselnde Verfinsterungen und Aufhellungen des Grundes, die oft mit den Atemzügen in gleichem Rhythmus geschehen (J. Müller[1], ich selbst). So bringt auch jede Bewegung der Augen oder Augenlider, jede Veränderung der Akkommodation Veränderungen des Lichtstaubes hervor. Auffallend sind diese Gestalten besonders, wenn man in einem unbekannten ganz dunkeln Raume, z. B. in einem dunkeln Treppenflur, den Weg tappend sucht, weil sie sich dann an die Stelle der wirklichen Objekte stellen. Dabei bemerkt Purkinje, daß jede unvermutete Berührung, jede unsichere Bewegung momentane Oszillationen des Auges hervorruft, die von zarten Lichtwölkchen und anderen Lichtgebilden begleitet sind, welche Veranlassung zu manchen Gespenstergeschichten gegeben haben mögen.

Nach körperlicher Anstrengung und Erhitzung sah Purkinje[2] im dunkeln Gesichtsfelde ein mattes Licht wallen und flackern, wie die auf einer horizontalen Fläche verlöschende Flamme von ausgegossenem Weingeiste. Bei schärferer Betrachtung sah er darin unzählige, äußerst kleine lichte Pünktchen, die sich lebhaft durcheinander bewegen, und lichte Spuren ihrer Bewegung hinter sich lassen. Eine ähnliche Erscheinung trat ein, wenn er bei geschlossenem rechten Auge das schwache linke zum Sehen anstrengte.

Wichtig ist noch die Erfahrung, daß auch bei Leuten, deren Auge durch Operation entfernt, oder deren Sehnerven und Augen desorganisiert und funktionsunfähig geworden waren, subjektive Lichterscheinungen vorgekommen sind[3]. Aus diesen Erfahrungen geht hervor, daß nicht bloß die Netzhaut, sondern auch der Stamm oder die Wurzeln des Sehnerven im Gehirn fähig sind, infolge von Reizungen, Lichtempfindung zu erzeugen.

Endlich sind die elektrischen Ströme ein mächtiges Mittel, den Sehnervenapparat, wie die übrigen Nerven zu erregen. Während in der Regel die motorischen Nerven nur in den Augenblicken Zuckung bewirken, wo die Stärke des sie durchfließenden elektrischen Stromes einer schnellen Steigerung oder Abnahme ausgesetzt ist, so werden in den Sinnesnerven nicht nur durch Stromesschwankungen, sondern auch durch einen Strom von gleichmäßig anhaltender Stärke Empfindungen hervorgerufen, deren Qualität im letzteren Falle von der Stromesrichtung abhängt.

Wenn der Sehnerv durch Stromesschwankungen gereizt wird, entstehen starke Lichtblitze, die das ganze Gesichtsfeld überziehen. Man kann dieselben sowohl durch Entladungen von Leydener Flaschen als von galvanischen Säulen erzielen, wenn man die Elektrizität so durch den Körper leitet, daß hinreichend

[1] Phantastische Gesichtserscheinungen. S. 16.

[2] Beobachtungen und Versuche usw. I. 63, 134. II. 115.

[3] Beispiele bei J. Müller, Phantastische Gesichtserscheinungen. S. 30. — A. v. Humboldt, Gereizte Muskel- und Nervenfaser. Tl. II. S. 444. — Lincke, de fungo medullari. Lips. 1834.

starke Zweige der Strömung durch den Sehnerven möglichst parallel seinen Fasern gehen. Man legt also zweckmäßig den einen Zuleiter an die Stirn oder auf die geschlossenen Augenlider, den anderen in den Nacken, oder wenn man bei hinreichend kräftigen Apparaten einen großen Widerstand nicht zu scheuen hat, nimmt man ihn in die Hand. Um den Schmerz in der Haut zu mildern, ist es vorteilhaft, die Zuleiter, welche die Form von Platten oder Zylindern haben können, mit nassen Pappscheiben zu bedecken und die zu berührende Hautstelle einige Zeit vorher schon anzufeuchten. Mit den Schlägen von Leydener Flaschen sind bisher wenig hierher gehörige Versuche angestellt worden, auch ist große Vorsicht wegen der Nähe des Gehirns notwendig, da Franklin und Wilke[1] beobachtet haben, daß durch den Kopf geleitete Schläge ein bewußtloses Zusammenstürzen zur Folge haben können. Le Roy[2] ließ den Entladungsschlag auf einen am Star erblindeten jungen Mann wirken, indem er dessen Kopf und rechtes Bein mit einem Messingdrahte umwand und durch die Enden der Drähte eine Leydener Flasche entlud. Bei jeder Entladung glaubte der Patient eine Flamme sehr schnell von oben nach unten vorbeigehen zu sehen, und hörte einen Knall wie von grobem Geschütze. Wenn Le Roy den Schlag durch den Kopf des Blinden allein leitete, indem er über den Augen und am Hinterkopfe Metallplatten befestigte, die mit den Belegungen einer Flasche verbunden wurden, so sah der Kranke Phantasmen, einzelne Personen, in Reihe gestellte Volkshaufen usw.

Reicher sind die Erfahrungen über die Wirkungen der galvanischen Ströme. Will man nur die Lichtblitze wahrnehmen, die durch Schließung oder Unterbrechung des Stromes entstehen, so genügen schon wenige Zinkkupferelemente, bei reizbaren Augen sogar schon ein einfaches Plattenpaar. Wenn zum Beispiel ein Stück Zink an die befeuchteten Lider des einen, Silber an die des anderen Auges gelegt wird, und man die beiden Metalle in Berührung bringt, so erscheint im Momente der Berührung und dann wieder im Momente der Trennung ein Blitz. Belehrender ist der Versuch, wenn man das eine Metall an ein Auge legt, das andere in den Mund nimmt, weil dabei zugleich die Abhängigkeit der Stärke des Blitzes von der Stromesrichtung erkannt werden kann. Der Blitz bei Schließung der Kette ist nach den Beobachtungen von Pfaff stärker, wenn man das positive Metall (Zink) an das Auge, das negative (Silber) in den Mund bringt, wobei also der Sehnerv von der positiven Elektrizität in aufsteigender Richtung durchflossen wird. Ich bemerke hierbei, daß mir selbst die Versuche mit der einfachen Kette, wahrscheinlich wegen zu geringer Reizbarkeit meines Auges, nie gelungen sind. Dagegen sind die Lichtblitze sehr glänzend, wenn man eine kleine galvanische Säule von etwa zwölf Elementen benutzt. Wählt man eine Batterie von konstanter Stromesstärke, z. B. von Daniellschen Elementen, so findet man, daß der Schließungsblitz bei aufsteigender Stromesrichtung, der Öffnungsblitz bei absteigender stärker ist. Ähnliche Unterschiede der Wirkung je nach der Richtung des Stroms sind auch für die Muskelnerven bekannt, sie sind dort aber auch von der Stärke des angewendeten Stroms abhängig.

Um die dauernde Wirkung eines gleichmäßig anhaltenden Stroms wahrzunehmen, brauchen wohl die meisten Augen eine kleine Säule, obgleich

[1] Franklin, Briefe über Elektrizität. Leipzig 1758. S. 312.
[2] *Mém. de mathém. de l'Acad. de France.* 1755. p. 86—92.

Ritter auch diese mit der einfachen Kette wahrgenommen hat. Um die Blendung des Auges durch Lichtblitze und das unangenehme Muskelzucken bei Öffnung und Schließung des Stroms zu vermeiden, finde ich es vorteilhaft, am Rande des Tisches, neben welchen sich der Experimentierende hinsetzt, zwei mit Pappe, die mit Salzwasser getränkt ist, umwickelte Metallzylinder hinzulegen, die mit den beiden Polen einer Daniellschen Batterie von 12 bis 24 Elementen verbunden sind. Man stützt zuerst die Stirne fest auf einen der Zylinder und berührt dann mit der Hand den anderen, wobei man durch langsames Anlegen der Hand erreichen kann, daß die Wirkungen der Stromesschwankung sehr gering sind, dann nach Belieben wieder öffnen oder schließen kann. Die Stromesrichtung läßt sich wechseln, indem man die Stirn bald auf den einen, bald auf den anderen Zylinder legt. Das Auge ist hierbei auch keinem Drucke ausgesetzt, worauf wohl zu achten ist.

Wenn ein schwacher aufsteigender Strom durch den Sehnerven geleitet wird, wird das dunkle Gesichtsfeld der geschlossenen Augen heller als vorher und nimmt eine weißlich violette Farbe an. In dem erhellten Felde erscheint in den ersten Augenblicken die Eintrittsstelle des Sehnerven als eine dunkle Kreisscheibe. Die Erhellung nimmt schnell an Intensität ab, und verschwindet ganz bei der Unterbrechung des Stroms, die man bei langsamer Lösung der Hand von dem zweiten Zylinder ohne Lichtblitz ausführen kann. Dafür tritt nun, im Gegensatz zu dem vorausgegangenen Blau, mit der Verdunkelung des Gesichtsfeldes auch eine rötlich gelbe Färbung des Eigenlichts der Netzhaut ein.

Bei der Schließung der entgegengesetzten, absteigenden Stromesrichtung tritt der auffallende Erfolg ein, daß das nur mit dem Eigenlicht der Netzhaut gefüllte Gesichtsfeld im allgemeinen dunkler wird als vorher, und sich etwas rötlich gelb färbt; nur die Eintrittsstelle des Sehnerven zeichnet sich als eine helle blaue Kreisscheibe auf dem dunkeln Grunde ab, von welcher Scheibe häufig auch nur die der Mitte des Gesichtsfeldes zugekehrte Hälfte erscheint. Bei Unterbrechung dieser Stromesrichtung wird das Gesichtsfeld wieder heller und zwar bläulichweiß beleuchtet, und der Sehnerveneintritt erscheint dunkel.

Die bei absteigender Stromesrichtung eintretende Verdunkelung des Gesichtsfeldes läßt erkennen, daß wir es bei diesen Versuchen nicht, oder wenigstens nicht allein mit einer Reizung durch Elektrizität zu tun haben, sondern daß auch noch die Veränderungen der Reizbarkeit durch elektrische Ströme in Betracht kommen. Durch schwache Ströme wird nach Pflügers[1] Versuchen die Reizbarkeit des Nerven an der Strecke gesteigert, wo die positive Elektrizität hinfließt, an der Strecke vermindert, wo jene Elektrizität herkommt. Sie würde demnach bei aufsteigendem Strome am Hirnende des Sehnerven vermehrt, am Retinalende vermindert sein, umgekehrt bei absteigendem Strome. Die Verminderung und Vermehrung des Eigenlichts des Auges würde sich daher nach dem Pflügerschen Gesetze erklären, wenn wir annehmen, daß die inneren Reizmittel, welche es hervorbringen, auf das Hirnende des Sehnerven einwirken. Dann wird der aufsteigende Strom Steigerung, der absteigende Schwächung des Eigenlichts hervorbringen müssen. Ob die entgegengesetzte Beleuchtung am Sehnerven als Kontrast oder als innere Reizung am Umfange

[1] Untersuchungen über die Physiologie des Elektrotonus. Berlin 1859. Siehe darüber unten § 25.

seines Eintritts in die Netzhaut zu deuten sei, bleibt zweifelhaft. Es stimmt ferner mit der gegebenen Erklärung überein, daß nach Ritters Bemerkung während der Dauer des aufsteigenden Stroms äußere Gegenstände undeutlicher, während des aufsteigenden Stroms deutlicher erscheinen, denn für Reizungen der Netzhaut selbst muß der aufsteigende Strom die Empfindlichkeit vermehren. Für lichtschwache Objekte kann ich das Faktum bestätigen. Übrigens paßt darauf auch vollständig Purkinjes Erklärung, welcher annimmt, daß die Verminderung der Deutlichkeit des objektiven Sehens von der Vermehrung des Eigenlichts des Auges herrühre, welches wie ein Nebelschleier wirke; jedenfalls verhindert diese Erhellung und Verdunkelung des Gesichtsfeldes zu erkennen, ob man das Licht der einzelnen Objekte stärker oder schwächer empfinde.

Wenn der konstante Strom zu fließen aufhört, bleibt nach Pflüger an den unempfindlicher gewordenen Stellen des Nerven vermehrte Empfindlichkeit zurück, wovon in unserem Falle die Aufhellung des Gesichtsfeldes Kunde gibt. An den vorher empfindlicher gewesenen Stellen des Nerven folgt dagegen zuerst ein kurzes Stadium (bis 10 Sekunden) verminderter Empfindlichkeit, dem dann wieder schwach gesteigerte Empfindlichkeit folgt. Dem ersteren entspricht in unserem Falle die Verdunkelung des Gesichtsfeldes nach Öffnung des aufsteigenden Stroms; das letztere gibt sich nur dadurch zu erkennen, daß die Verdunkelung bald in den normalen Zustand überzugehen scheint.

Bei stärkeren Strömen von 100 bis 200 Zink-Kupferplatten hat Ritter eine Umkehr der Färbung gesehen, während die Vermehrung oder Verminderung der Helligkeit dieselbe blieb, wie bei schwachen Strömen. Starke aufsteigende Ströme erregten ihm also die Empfindung von lichtstarkem Grün, noch stärkere von lichtstarkem Rot, starke absteigende von lichtschwachem Blau. Nach der Unterbrechung des Stroms sah er im ersten Falle zuerst Blau, was schnell in das zurückbleibende Rot der schwachen Ströme umschlug. Nach der Unterbrechung des starken absteigenden Stroms sah er dagegen im ersten Augenblicke Rot, was schnell in das gewöhnliche Blau umschlug. Ich selbst fand, daß bei stärkeren Strömen[1] ein wildes Durcheinanderwogen von Farben entstand, in welchem ich keine Regel zu entdecken vermochte.

Ritter gibt auch noch an, daß das aufsteigend durchströmte Auge die äußeren Gegenstände nicht bloß undeutlicher, sondern auch verkleinert sehe. Das läßt vermuten, daß er die Augen für die Nähe akkommodiert habe. Man kann sich unter Einfluß des heftigen Hautschmerzes, den die einströmende Elektrizität erregt, kaum erwehren, die benachbarten Muskeln zu spannen, die Stirn zu runzeln, die Augenlider zusammenzukneifen. Die meisten Personen sind geneigt, bei jeder Anstrengung des Auges oder seiner Nachbarteile für die Nähe zu akkommodieren, und das hat dann auch einen gewissen Einfluß auf die Vorstellung von der Größe der gesehenen Dinge. Du Bois-Reymond[2] macht darauf aufmerksam, daß Zusammenziehung der Pupille bei elektrischer Durchströmung des Auges bemerkt sei, wobei wohl auch eine Veränderung des

[1] Der Strom von 24 Daniellschen Elementen wurde durch breite, mit nasser Pappe belegte Metallplatten in Stirn und Nacken eingeleitet. Da der Widerstand in diesem Kreise sehr viel geringer war als bei Ritters Anordnung, welcher eine Säule von großem Widerstande und auch noch seinen Arm in dem Kreise hatte, so läßt sich das Verhältnis der Stromstärke in meinen und Ritters Versuchen nicht wohl bestimmen.

[2] Untersuchungen über tierische Elektrizität. Berlin 1848. Bd. I. S. 353.

Akkommodationsapparates eintreten könne. Bei absteigendem Strome gibt Ritter umgekehrt an, die Gegenstände deutlicher und größer gesehen zu haben.

Endlich beschreibt Purkinje noch besondere Gestalten, welche die elektrische Lichterscheinung annimmt, wenn man die Elektrizität aus einem Leiter mit schmaler Spitze entweder in die Mitte der geschlossenen Augenlider oder in die Nachbarschaft des Auges einströmen läßt. Im Achsenpunkte des Auges zeigte sich die Wirkung des Stromes in der schon angegebenen Weise immer am entschiedensten, hier bildete sich ein rautenförmiger Fleck, der von mehreren abwechselnd dunkeln und hellen rautenförmigen Bändern umgeben war. Die Eintrittsstelle des Sehnerven zeigte dagegen immer die entgegengesetzte Phase elektrischer Wirkung. Bei aufsteigendem Strome also erschien der Achsenpunkt des Auges als eine hellblaue Raute, zunächst umgeben von einem dunkeln Bande, der Sehnerv als eine dunkle Scheibe, von einem blauen Scheine umgeben. Bei absteigendem Strome erschien der Achsenpunkt als eine dunkle Raute, umgeben von rotgelben Bändern, der Sehnerv als eine hell leuchtende Scheibe. Bei kontinuierlicher Strömung verschwanden die Figuren bald, bei intermittierender Strömung, welche Purkinje durch Bewegung der stromleitenden Ketten hervorbrachte, erschien dauernd die blaue Figur, welche an Lichtstärke die entgegengesetzte rotgelbe bei weitem überwog.

Die von Purkinje beschriebenen Erscheinungen an der Eintrittsstelle des Sehnerven werden von den meisten Individuen gesehen, statt der rautenförmigen Figuren dagegen wurden von mir und anderen Personen, welche ich die Versuche anstellen ließ, nur unbestimmt begrenzte Lichtmassen gesehen. Purkinje beobachtete ganz ähnliche rautenförmige Figuren bei Kompression des Auges. Da mir nicht bekannt ist, daß diese Rautenflächen von einem anderen Beobachter gesehen seien, so bleibt es vorläufig fraglich, ob ihre regelmäßige Gestalt nicht auf individuellen Eigentümlichkeiten von Purkinjes Augen beruhte.

Wenn der Strom in der Nähe des Auges durch einen schmalen Zuleiter eingeleitet wurde, so blieb die dem gelben Flecke und dem Eintritte des Sehnerven entsprechende Lichterscheinung dieselbe wie vorher, außerdem wurde aber an der Grenze des Gesichtsfeldes und ihr parallel ein dunkler Bogen bemerkbar, der bei Bewegungen des Auges seinen scheinbaren Ort behielt, während die vom gelben Fleck und Sehnerven abhängigen Erscheinungen den Bewegungen des Auges scheinbar folgen. Der genannte dunkle Bogen des Gesichtsfeldes befindet sich oben, wenn der Leiter unter dem Auge angelegt ist, rechts, wenn jener links angelegt ist, und umgekehrt. Daraus folgt, daß diejenigen Stellen der Netzhaut kein Licht empfinden, welche dem Leiter am nächsten sind. Um diese Erscheinung deutlich zu sehen, wendete Purkinje übrigens Ketten als Zuleiter an; bei jeder Bewegung gaben diese Stromunterbrechungen*.

* G. E. Müller hat die interessante Tatsache festgestellt, daß die Reizschwelle für galvanische Lichtempfindung im Zustande der Helladaptation und Dunkeladaptation keine merklichen Unterschiede aufweist. Dies trifft auch für meine (N.s) Augen zu und ist deshalb so bemerkenswert, weil die Empfindlichkeit für den adäquaten Lichtreiz bei länger dauerndem Lichtabschluß in hohem Grade zunimmt. Ich fand auch die (allerdings nur ungenau bestimmbare) Reizschwelle des Druckphosphens im helladaptierten und im dunkeladaptierten Auge nicht merklich differierend. Allerdings ändert sich das Druckphosphen beim Eintritt der Dunkeladaptation in qualitativer Hinsicht. Während der Druck mit einer stumpfen Spitze auf die Temporalseite des Augapfels bei helladaptiertem Auge im dunklen Gesichtsfeld

Die Lehre von den Gesichtsempfindungen fiel in älterer Zeit noch ganz der Philosophie anheim, solange positive Kenntnisse darüber fehlten. Zunächst mußte eingesehen werden, daß die Empfindungen nur Wirkungen der Außendinge auf unseren Körper seien, und daß die Wahrnehmung erst durch psychische Prozesse aus der Empfindung gebildet würde. Mit dieser Einsicht ringt die griechische Philosophie[1]. Sie beginnt mit naiven Voraussetzungen über Möglichkeiten, wie Bilder, die den Gegenständen entsprächen, in die Seele kommen sollten. Demokrit und Epikur lassen solche Bilder sich von den Gegenständen loslösen und in das Auge fließen. Empedokles läßt Strahlen sowohl vom Lichte wie vom Auge nach den Gegenständen fließen, und mit letzteren die Gegenstände gleichsam betasten. Plato scheint zu schwanken. Im Timaeus schließt er sich dieser Vorstellungsweise des Empedokles an; er erklärt die vom Auge ausgehenden Strahlen für ähnlich dem Lichte, aber nicht brennend, und läßt das Sehen nur zustande kommen, wo das innere Licht herausgehend an den Gegenständen das verwandte äußere Licht trifft. Im Theaetet dagegen nähert er sich durch Untersuchungen über die geistige Tätigkeit bei den Wahrnehmungen schon dem reiferen Standpunkte des Aristoteles.

Bei letzterem[2] findet sich eine feine psychologische Untersuchung über die Mitwirkung geistiger Tätigkeit in den Sinneswahrnehmungen, das Physikalische und Physiologische, die Empfindung ist deutlich unterschieden von dem Psychischen; die Wahrnehmung äußerer Objekte beruht nicht mehr auf einer Art feiner Fühlfäden des Auges, wie die Gesichtsnerven des Empedokles, sondern auf Urteil. Das Physikalische an seinen Vorstellungen ist freilich sehr unentwickelt, doch könnte man in den Grundzügen desselben Spuren der Undulationstheorie finden. Denn das Licht ist bei ihm nichts Körperliches, sondern eine Tätigkeit (ἐνέργεια) des zwischen den Körpern enthaltenen Durchsichtigen, welches im Zustande der Ruhe Dunkelheit ist. Doch erhebt er sich noch nicht zu der Vorstellung, daß die Wirkung des Lichtes auf das Auge nicht notwendig dem erregenden Lichte gleichartig zu sein braucht. Er sucht vielmehr diese Gleichartigkeit dadurch zu begründen, daß auch das Auge Durchsichtiges enthalte, welches in dieselbe Art von Tätigkeit wie das äußere Durchsichtige treten kann.

Im Mittelalter blieben die eigentlichen und entscheidenden Fortschritte, welche Aristoteles in der Theorie des Sehens gemacht hatte, unbeachtet, erst Baco von Verulam und seine Nachfolger nehmen diesen Faden wieder auf, diskutieren scharf die Abhängigkeit der Vorstellungen von den Empfindungen, bis Kant in seiner Kritik der reinen Vernunft den Abschluß ihrer Theorie liefert.

In derselben Zeit waren die Naturforscher meist nur mit dem seit Keppler sich schnell entwickelnden physikalischen Teile der Theorie des Sehens beschäftigt. Durch Haller wurde zunächst im allgemeinen die Lehre von der Reizbarkeit der Nerven festgestellt; dementsprechend beschreibt dieser auch ganz richtig und klar das Verhältnis des Lichtes zur Empfindung, dieser zur Wahrnehmung.[3] Aber es fehlte noch die genauere Kenntnis der durch andere Reizmittel entstehenden Er-

---

einen schmalen, deutlich gelblich gefärbten, Lichtring auftreten läßt, erscheint in dem während einer halben Stunde vor Lichteinfall geschützten Auge der Lichtring viel breiter und glänzend bläulichweiß. Dadurch ist das Phänomen auffallender, ein Unterschied der Reizschwelle bei fein abgestuften Druckreizen ist aber, wie gesagt, nicht zu finden. N.

G. E. Müller, Über die galvanischen Gesichtsempfindungen. Zeitschr. f. Psych. u. Physiol. d. Sinnesorgane, **14**, 329.

W. Nagel, Einige Beobachtungen über die Wirkung des Druckes und des galvanischen Stromes auf das dunkeladaptierte Auge. Ebenda **34**, 285.

---

[1] Vergl.. Wundt, Zur Geschichte der Theorie des Sehens in Henle und Pfeuffers Zeitschrift für rationelle Medizin. 1859.

[2] De sensibus, de anima lib. II. c. 5—8 und de coloribus.

[3] Elem. Physiolog. Tom. V. lib. 16 u. 17.

regungen des Auges, oder wenigstens, was man davon kannte, war vereinzelt, und wurde deshalb nur als Curiosum betrachtet. Das Verdienst, die Aufmerksamkeit der deutschen Naturforscher auf die Wichtigkeit dieser Kenntnis hingeleitet zu haben, gebührt Goethe in seiner Farbenlehre, wenn ihm auch der Hauptzweck dieses Buches, eine Reform der physikalischen Lichtlehre, die sich der unmittelbaren sinnlichen Anschauung besser anschlösse, zu erzwingen, fehlschlug. Darauf folgen nun die reichen Beobachtungen über Erregungen der Empfindungsnerven von Ritter und den andern Galvanikern, namentlich aber die Beobachtungen von Purkinje, so daß im Jahre 1826 J. Müller die Hauptsätze dieses Gebiets hinstellen konnte in seiner Lehre von den spezifischen Sinnesenergien, wie er sie in seinem Werke über die vergleichende Physiologie des Gesichtsinns zuerst vortrug, und wie sie im Anfange dieses Paragraphen dargestellt ist. Dies Werk und das von Purkinje stehen in ausgesprochener Beziehung zu Goethes Farbenlehre, wenn auch J. Müller deren physikalische Sätze später aufgegeben hat. Das Müllersche Gesetz von den spezifischen Energien war ein Fortschritt von der außerordentlichsten Wichtigkeit für die ganze Lehre von den Sinneswahrnehmungen, ist seitdem das wissenschaftliche Fundament dieser Lehre geworden, und ist in gewissem Sinne die empirische Ausführung der theoretischen Darstellung Kants von der Natur des menschlichen Erkenntnisvermögens.

Die Druckbilder kannte schon Aristoteles. Newton[1] gibt die hypothetische Erklärung, daß die mechanische Erschütterung der Netzhaut eine ähnliche Bewegung in ihr errege, wie die auf diese Haut stoßenden Lichtstrahlen. Diese Bewegung der Netzhaut betrachtet er als Ursache der Lichtempfindung. Die Meinung, daß bei den Druckbildern sowohl, als auch bei anderen Gelegenheiten im Auge sich objektives Licht entwickele, hat übrigens bis in neuere Zeit ihre Anhänger gehabt, wovon der oben erwähnte gerichtsärztliche Fall ein Beispiel gibt, in welchem der begutachtende Medizinalrat Seiler die Möglichkeit eines solchen Ereignisses glaubte zulassen zu müssen. Es hat aber niemals ein zweiter Beobachter objektiv das so entwickelte Licht wahrnehmen können. Um diese Meinung wahrscheinlich zu machen, stützte man sich teils auf Fälle von Menschen, die in der Dunkelheit, d. h. bei sehr wenig Licht, hatten sehen können, wie Kaiser Tiberius, Cardanus, Kaspar Hauser, teils auf das sogenannte Leuchten der Tieraugen, der albinotischen oder sonst krankhaft verbildeten Menschenaugen, welches nur auf Reflexion des Lichts beruht, teils auf stark entwickelte Nachbilder, die des Abends nach verlöschtem Licht bei älteren Männern zuweilen lange zurückzubleiben scheinen; sie sollten die Möglichkeit der Lichtentwickelung im Auge beweisen. Genauere Beschreibungen der Druckbilder sind in neuerer Zeit von Purkinje, Serres d'Uzès gegeben worden. Der Gebrauch, den Thomas Young in der Akkommodationslehre davon machte, ist oben Bd. I, 134 erwähnt.

Den Öffnungs- und Schließungsblitz bei elektrischer Durchströmung beobachtete schon Volta; Ritter nahm selbst mit der einfachen Kette die dauernden Lichtwirkungen wahr, später gab namentlich Purkinje eine ausführliche Beschreibung.

*Nachtrag von Helmholtz aus der 1. Aufl.*

Auf Seite 15 ist darauf aufmerksam gemacht worden, daß die Wirkungen konstanter elektrischer Ströme auf den Sehnervenapparat nicht, wie es bis dahin geschehen war, als Reizung, sondern als Veränderungen der Reizempfänglichkeit durch den elektrotonischen Zustand aufzufassen seien. Aber die Annahme, welche ich dort gemacht habe, daß die dauernde innere Erregung der Sehnervenfasern, für welche die Empfindlichkeit gesteigert werde, am Hirnende des

[1] Optice, am Schluß Quaestio XVI.

Nerven stattfinde, paßt nicht zu den Erscheinungen, welche bei der Einströmung der Elektrizität durch einen schmalen Zuleiter unmittelbar in den Augapfel selbst auftreten und die auf Seite 7 schon teilweise nach Purkinje beschrieben sind. Es ist aus diesen vielmehr zu schließen, daß es die Radialfasern der Netzhaut sind, deren elektrotonischer Zustand zur Erscheinung kommt, und daß die konstante Erregung derselben an der hinteren Fläche der Netzhaut stattfindet.

Legt man die negative Elektrode im Nacken an und benutzt als positive Elektrode ein kegelförmig zugespitztes und mit Salzwasser getränktes Stück Schwamm, was an einem Stiel von Metall befestigt ist und nahe am äußeren Augenwinkel an die wohlbefeuchteten Augenlider mit seiner Spitze angelegt wird, so erscheint das Gesichtsfeld nach der Nasenseite hin dunkel, auf der Schläfenseite hell; die Eintrittsstelle des Sehnerven, welche in den hellen Teil fällt, erscheint dunkel. Wendet man das Auge so, daß der Fixationspunkt an die Grenze des hellen und dunklen Teiles fällt, so erscheint von ihm aus ein helles Lichtbüschel gegen den dunklen Teil, ein dunkles Büschel gegen den hellen Teil des Gesichtsfeldes gekehrt. Diese beiden oval abgegrenzten Büschel bedecken etwa die Ausdehnung des gelben Flecks.

Kehrt man die Stromesrichtung um, so vertauschen sich Hell und Dunkel der ganzen Erscheinung. Wie Umkehr der Stromesrichtung wirkt für einen Augenblick auch Unterbrechung des Stroms.

Alle diese Erscheinungen erklären sich einfach aus dem elektrotonischen Zustande der radial verlaufenden Nervenbahnen der Netzhaut, wenn man annimmt, daß an ihrem hinteren Ende eine fortdauernde schwache Reizung durch innere Ursachen unterhalten werde, wie eine solche sich in dem Eigenlicht der Netzhaut zu erkennen gibt.

Wenn die positive Elektrizität auf der äußeren Seite des Auges in den Augapfel einströmt, an der inneren und hinteren Seite wieder ausströmt, so wird die Erregbarkeit der Netzhaut an ihrer hinteren Fläche dort geschwächt, hier vermehrt werden; daher die innere Hälfte des Sehfeldes, welche der äußeren Netzhauthälfte entspricht, dunkel, die äußere Hälfte desselben hell erscheinen muß. Der Sehnerv wirkt wahrscheinlich als schlecht leitende Masse und schwächt den Strom nahe seiner Eintrittsstelle, daher diese sich durch entgegengesetzte Beleuchtung vor ihrem Grunde auszeichnet. Steht der gelbe Fleck an der Grenze der entgegengesetzt durchströmten Netzhautteile, so geht in ihm die Strömung nach der Flächenrichtung der Netzhaut. Im gelben Fleck haben wir aber auch in der Fläche der Membran verlaufende Faserbündel. Diese werden also von der positiven Elektrizität in der Richtung von der Schläfe nach der Nase durchflossen, das heißt, die Fasern an der Schläfenseite der Netzhautgrube werden durchflossen in der Richtung gegen ihr mit den Zapfen in Verbindung stehendes Ende hin, die an der Nasenseite der Netzhautgrube von diesem Ende weg. In jenen wird die Erregung gesteigert, in diesen vermindert; daher das helle Büschel auf der Nasenseite des Fixationspunktes im Gesichtsfelde, das dunkle Büschel auf seiner Schläfenseite.

Ändert man die Eintrittsstelle des Stroms, so verschiebt sich die ganze Erscheinung entsprechend.

*Zusatz von W. Nagel. Eine Veränderung der Lichtreizschwelle habe ich weder bei aufsteigendem noch bei absteigendem Strome feststellen können. N.*

Mechanische Reizung.

1706. J. Newton, Optice, am Schluß Quaestio XVI.
1774. Eichel in Collectan. soc. med. Havniensis 1774.
1797. A. v. Humboldt, Versuche über die gereizte Muskel- und Nervenfaser. II. 444.
1801. Th. Young, *on the mechanism of the eye. Phil. Transact.* 1801. I. 23.
1819 u. 25.*Purkinje, Beobachtungen und Versuche zur Physiologie der Sinne. I. 78, 126. 136, II. 115.
1825. Magendie, *Journal de Physiologie.* IV. 180. V. 189.
1826. J. Müller, Über die phantastischen Gesichtserscheinungen. Koblenz. S. 30.
1832. D. Brewster in Poggendorffs Ann. XXVI. 156. *Phil. Mag.* I. 56.
1833 Seiler in Henkes Zeitschr. für gerichtl. Med. 1833. 4. Quartal. S. 266.
1834. Lincke, De fungo medullari. Lipsiae.
Quetelet, Poggendorffs Ann. XXXI. 494.
J. Müller in seinem Archiv für Anat. und Physiol. 1834. S. 140.
1840. Tourtual in J. Müllers Handbuch der Physiologie II. 259.
1850. Serres d'Uzès, *Du phosphène. C. R.* XXXI. 375—378.
1854 u. 55.*Czermak, Physiologische Studien. Abt. I. § 5. S. 42 und Abt. II. S. 32. Wiener Sitzungsberichte XII. 322 und XV. 454.
1856. A. E. Laiblin, Die Wahrnehmung der Choroidealgefäße des eigenen Auges. Dissert. Tübingen.
Meissner, Bericht über die Fortschritte der Physiologie im Jahre 1856, S. 568 in Henles Zeitschr. für ration. Medizin.
1858. J. Czermak, Über das Akkommodationsphosphen. Wiener Ber. XXVII, 78—86. Archiv für Ophthalmologie. VII, 1. p. 147—154.

Elektrische Reizung.

1755. Le Roy, *Mém. de Mathém. de l'Acad. de France.* 1755. p. 86—92.
1794. Pfaff in Grens Journal der Physik VIII. 252, 253.
1795. Pfaff, Über tierische Elektrizität. S. 142.
1798. Ritter, Beweis, daß ein beständiger Galvanismus den Lebensprozeß im Tierreiche begleite. Weimar 1798. S. 127.
1800. Volta, *Colexione dell' Opere.* Tom. II, P. II. p. 124.
*Ritter, Beiträge zur näheren Kenntnis des Galvanismus. Bd. II. St. 3, 4. S. 159, 166. § 93.
1801 u. 5. Ritter in Gilberts Annalen VII. 448. XIX, 6—8.
1819. Purkinje, Beobachtungen und Versuche zur Physiologie der Sinne. Bd. I. Prag 1819. S. 50. Bd. II. Berlin 1825. S. 31. Kastners Archiv für die gesamte Naturlehre 1825. V. 434.
1823. Most, Über die großen Heilkräfte des in unseren Tagen mit Unrecht vernachlässigten Galvanismus. Lüneburg 1823. S. 812.
1829. Fechner, Lehrbuch des Galvanismus und der Elektrochemie. Kap. 39. S. 485 ff.
1830. Hjort, De Functione retinae nervosae. Part. II. Christiania 1830. (Dissert.) p. 34. § 17.
1848. E. du Bois-Reymond, Untersuchungen über tierische Elektrizität. I. 283—293; 338—358.
1863. R. Schelske, Über Farbenempfindungen. Archiv für Ophthalmol. IX, (3). S. 39—62.
1864. Aubert, Physiologie der Netzhaut. Breslau. S. 333—390.

*Zusatz zu § 17. Die Reizung des Sehnervenapparates durch Röntgen- und Becquerelstrahlen; von W. Nagel.*

Im Anschluß an die im § 17 gemachten Mitteilungen von Helmholtz über die Wirkung der adäquaten und inadäquaten Reize auf das Sehorgan verdient noch die Tatsache Erwähnung, daß auch die Röntgenstrahlen sowie die Einwirkung der sogenannten radioaktiven Substanzen im Auge Lichtempfindung auszulösen vermögen. Die Lichtempfindung in dem von Röntgenstrahlen ge-

troffenen Auge haben Brandes und Dorn[1]) zuerst bemerkt. Cowl und Levy-Dorn[2]) glaubten dann diese Beobachtung auf Täuschungen besonders durch elektrische Fernwirkungen zurückführen zu können. Die erstgenannten Autoren, sowie Röntgen[3]), Himstedt und Nagel[4]) u. a. zeigten indessen, daß auch mit Vermeidung derartiger Fehlerquellen Lichtempfindung zu erzielen ist. Die Röhre kann in einen lichtdichten Kasten aus dünnem für Licht undurchlässigem Aluminiumblech eingeschlossen werden und erzeugt dennoch im Auge einen kräftigen Lichtschein, vorausgesetzt nur, daß das Auge zuvor eine Viertelstunde oder noch längere Zeit vor Lichteinfall bewahrt geblieben ist. Dieser Lichtschein ist im allgemeinen ein ziemlich diffuser.

Wenn man dagegen begrenzte Teile der Netzhaut von den Strahlen treffen läßt und die übrige Netzhaut durch dicke Bleischirme vor der Einwirkung der Röntgenstrahlen schützt, treten auch scharf begrenzte Lichterscheinungen auf. Bringt man z. B. in einer dicken Bleiplatte ein 3 mm weites Loch an, hält dieses Diaphragma seitlich neben das Auge und läßt nun die Röntgenstrahlen den Augapfel von der Schläfenseite nach der Nasenseite quer durchsetzen, so schneidet das Strahlenbüschel die Netzhaut zweimal und man sieht dementsprechend zwei helle Kreise, die ganz ebenso nach außen projiziert werden, wie die Druckphosphene.

Bei Durchstrahlung des Auges von der Schläfenseite her erscheint der nasalwärts projizierte Fleck heller als der temporal gesehene, was leicht erklärlich ist, da der nasale Lichtschein von der Reizung der temporalen Netzhauthälfte herrührt, der temporal projizierte Schein von der Reizung auf der Nasalhälfte und die Strahlen, ehe sie zu dieser gelangen, im Glaskörper zwar nicht erheblich, aber doch immerhin merklich absorbiert werden.

Sehr auffallend ist diesen Verhältnissen gegenüber die Tatsache, daß bei freier Durchstrahlung des Auges ohne Einschaltung eines Diaphragmas die größte Helligkeit regelmäßig auf der Seite gesehen wird, auf der die Strahlenquelle steht, im allgemeinen also bei seitlicher Bestrahlung temporalwärts. Dasselbe ist, wie gleich bemerkt sei, bei Einwirkung von Radiumstrahlen der Fall.

Sehr instruktiv sind die Beobachtungen, die man macht, während man ein spaltförmiges Diaphragma zwischen Auge und Röntgenröhre hin- und herbewegt. Da die Röntgenstrahlen das Auge ungebrochen passieren, müssen die Schnittlinien dieses flächenhaft ausgedehnten Strahlenbüschels mit der annähernd kugeligen Netzhaut, nach außen projiziert, je nach dem Ort der Reizung im allgemeinen gekrümmt erscheinen. Am anschaulichsten wirkt die in frontaler Richtung von der Schläfenseite her erfolgende Durchstrahlung des Auges durch ein Diaphragma hindurch, das die Gestalt eines rechtwinkligen Kreuzes mit vertikalem und horizontalem Kreuzstrich hat. Fällt der Vertikalspalt mit der Äquatorebene des Auges zusammen, so sieht man zwei Kreuze, die aus annähernd geraden, sich rechtwinklig kreuzenden Linien bestehen. Schiebt man das Diaphragma weiter nach hinten, so verzerren sich die Kreuze bedeutend, um schließlich mit ihren horizontalen Linien zusammenzufließen.

---

[1]) Wiedemanns Ann. **60**, 478, 1897; **64**, 620, 1857; **66**, 1171, 1858.
[2]) Arch. f. (Anat. u.) Physiol. 1897.
[3]) Ber. d. preuß. Akad. 1897, 576.
[4]) Ann. d. Physik. IV F. 4, S. 537, 1901.

Himstedt und Nagel haben sich bemüht, festzustellen, ob die Reizwirkung der Röntgenstrahlen als eine direkte, derjenigen der Lichtstrahlen vergleichbare, anzusehen sei, oder ob Fluoreszenz der Augenmedien dabei eine entscheidende Rolle spiele, wie bei der Wahrnehmung des Ultraviolett und der Becquerelstrahlen (s. u.). Schon auf Grund der Möglichkeit, durch Röntgenstrahlen ganz scharf begrenzte Netzhautteile zu erregen, war es als höchst unwahrscheinlich zu betrachten, daß nennenswerte Fluoreszenz der brechenden Medien eintrete. In der Tat konnte Fluoreszenz an diesen Substanzen nicht einmal spurweise wahrgenommen werden. Die Netzhaut dagegen weist eine allerdings überaus schwache Fluoreszenz auf, weit schwächer als sie in ultravioletten Strahlen erzielt werden kann. Dahingestellt bleibt, ob etwa die lebende Netzhaut stärker fluoresziert.

Da nur das dunkeladaptierte Auge für die Röntgenstrahlen empfindlich ist, darf es als wahrscheinlich bezeichnet werden, daß dieselben Elemente in der Netzhaut, die im Dunkeln so stark an Empfindlichkeit für Lichtstrahlen gewinnen, die Stäbchen nach unserer Annahme, auch die Perzeptionsorgane für den Reiz der Röntgenstrahlen darstellen. Wenn auch die Fluoreszenz der bestrahlten Netzhaut schwach ist, so muß andererseits bedacht werden, daß die das Fluoreszenzlicht aussendende und die lichtempfindliche Schicht einander außerordentlich nahe liegen, ja vielleicht teilweise zusammenfallen und die Wahrnehmbarkeit der Röntgenstrahlen von diesem Gesichtspunkt aus wohl auf die Fluoreszenz der Netzhaut zurückgeführt werden könnte. Unerklärt bleibt einstweilen die oben erwähnte Tatsache der stärkeren Lichtempfindung in derjenigen Netzhauthälfte, in welche die Röntgenstrahlen vom Glaskörper aus eintreten.

Es ist mehrfach angegeben worden, daß die totalfarbenblinden Personen zum Sehen der Röntgenstrahlen besonders disponiert seien. Dies dürfte indessen nur darauf zurückzuführen sein, daß diese Personen erfahrungsgemäß ihre Augen möglichst vor dem Einfall hellen Lichtes schützen und beim Eintritt ins Dunkelzimmer daher schon weiter dunkeladaptiert sind, als normalsehende Vergleichspersonen.

Einem total farbenblinden jungen Mädchen verband ich beide Augen mit mehrfachen Lagen schwarzen Samtes so dicht, daß sie auch nach einer Stunde im hellen Zimmer keinen Lichtschimmer wahrnehmen konnte. Wenn nun die Röntgenröhre in Tätigkeit gesetzt wurde, sah sie diffuse Helligkeit schon wenn sie einen Meter entfernt war. Sie konnte auch mit verbundenen Augen ganz sicher angeben, wenn eine Bleiplatte in den Strahlengang eingeschoben oder entfernt wurde. Dasselbe gelingt übrigens nach einstündigem Lichtabschluß auch jedem Normalsehenden.

Hinsichtlich der vom Radium ausgehenden Becquerelstrahlen kann es keinem Zweifel unterliegen, daß ihre Wirkung auf den Sehapparat durch Vermittelung der Fluoreszenz aller durchsichtigen Teile des Auges einschließlich der Netzhaut erfolgt. Himstedt und Nagel haben diese Fluoreszenz bei einer Anzahl von Tieraugen leicht nachweisen können. Da die ganze das Auge erfüllende Masse, und vor allem die Linse unter dem Einfluß des Radiums selbstleuchtend wird, kann von zirkumskripter Reizung keine Rede sein, und die Helligkeit, die wahrgenommen wird, ist daher auch in der Tat eine diffuse, mit der Einschränkung allerdings, daß wie bei der Bestrahlung mit Röntgenstrahlen die stärkste Lichtempfindung auf die Seite lokalisiert wird, an der das Radiumpräparat anliegt.

## § 18. Von der Reizung durch Licht.

Wir haben jetzt das objektive Licht, die Ätherschwingungen, als Erregungsmittel des Sehnervenapparates zu betrachten. Die Ätherschwingungen gehören nicht zu den allgemeinen Reizmitteln der Nerven, die wie Elektrizität und mechanische Mißhandlung jede Stelle einer jeden Nervenfaser erregen könnten, und es läßt sich nachweisen, daß die Nervenfasern des Sehnerven innerhalb des Stammes dieses Nerven und innerhalb der Netzhaut von ihnen ebensowenig wie die motorischen und sensiblen Nervenfäden der übrigen Nerven erregt werden. Es sind vielmehr gewisse Hilfsapparate notwendig, die an den Enden der Opticusfasern in der Netzhaut liegen, in denen das objektive Licht den Anstoß zu einer Nervenerregung zu geben imstande ist.

Wir wollen hier zunächst nachweisen, daß die Nervenfasern im Stamme des Sehnerven durch objektives Licht nicht erregt werden. Die Masse dieser Fasern liegt an der Stelle, wo der Sehnerv durch die Sclerotica in das Auge eintritt, frei gegen die durchsichtigen Mittel des Auges gekehrt, sie ist nicht von schwarzem Pigment bedeckt, und zugleich durchscheinend genug, daß das Licht, was auf sie fällt, merklich in die Masse des Nerven eindringen kann. Man erkennt dies bei den Untersuchungen mit dem Augenspiegel daran, daß man häufig noch Windungen der Zentralgefäße innerhalb des Sehnerven erkennen kann, die von der Nervenmasse ganz überdeckt sind. Wenn dergleichen Gefäßwindungen im Innern der Nervensubstanz erkannt werden sollen, muß Licht bis zu ihnen hindringen und von ihnen aus wieder bis zum Auge des Beobachters gelangen können. Es ist also kein Hindernis für das in das Auge fallende Licht vorhanden, bis zu einer gewissen Tiefe in die Sehnervensubstanz einzudringen. Aber dieses Licht, was auf die Eintrittsstelle des Sehnerven fällt, wird nicht empfunden.

Man schließe das linke Auge und fixiere mit dem rechten das weiße Kreuzchen in Fig. 1, alsdann bringe man das Buch bei der gewöhnlichen horizontalen Richtung der Zeilen in eine Entfernung von etwa einem Fuß vom Auge, so wird man finden, daß es hier eine gewisse Stellung gibt, wo der weiße Kreis gänzlich verschwindet und der schwarze Grund ohne Lücke erscheint. Damit der Versuch gelinge, achte man aber sorgfältig darauf, daß man den Blick fest auf das Kreuzchen hefte und nicht seitwärts blicke. Nähert man das Buch mehr oder entfernt es weiter, so kommt der weiße Kreis wieder zum Vorschein, und wird im indirekten Sehen deutlich wahrgenommen; ebenso wenn man das Buch schief hält, so daß der weiße Kreis etwas höher oder tiefer zu stehen kommt. Wie der weiße Kreis verschwinden alle anderen Gegenstände, weiße, schwarze, farbige, welche nicht größer sind als der Kreis, wenn man sie auf denselben legt, und wie vorher verfährt. Man erkennt daraus, daß es im Gesichtsfelde eines jeden einzelnen Auges eine Stelle gibt, in welcher nichts erkannt wird, und daß es also in der Fläche der Netzhaut eine entsprechende Stelle gibt, welche die auf sie fallenden Bilder nicht wahrnimmt. Man nennt diese Stelle den blinden Fleck. Da die blinde Stelle im Gesichtsfelde des rechten Auges nach rechts vom Fixationspunkte, in dem des linken Auges links davon liegt, so muß der blinde Fleck der Netzhaut vom gelben Fleck aus nach der Nasenseite herüber liegen, in welcher Gegend sich die Eintrittsstelle des Sehnerven befindet.

Daß der blinde Fleck wirklich mit der Eintrittsstelle des Sehnerven identisch sei, hatte man schon früher durch Messung seiner scheinbaren Größe und seines scheinbaren Abstandes vom Fixationspunkte des Auges nachgewiesen. Einen noch direkteren Beweis hat Donders[1] mittels seines Augenspiegels gegeben. Er warf mit diesem Instrumente das Licht einer kleinen entfernt stehenden Flamme in das Auge des Beobachteten, und ließ dieses so wenden, daß das Flammenbildchen auf die Eintrittsstelle des Sehnerven fiel. Auf dieser Stelle ist das Flammenbildchen nicht scharf gezeichnet, und es wird gleichzeitig die ganze Eintrittsfläche des Sehnerven, obgleich mindestens 20 mal größer als das Flammenbildchen, ziemlich erleuchtet, was sich aus der durchscheinenden

Fig. 1.

Beschaffenheit der Nervenmasse erklärt. Auf der Netzhaut selbst neben dem Eintritt des Sehnerven bemerkte er kaum eine Spur von Licht, was entweder in den durchsichtigen Mitteln des Auges zerstreut sein konnte, oder von der hell erleuchteten Fläche des Sehnerven seitlich reflektiert war. Solange das Lichtbildchen ganz auf den Eintritt des Sehnerven fiel, hatte der Beobachtete keine Lichtempfindung. Einige meinten einen sehr schwachen Schimmer wahrzunehmen, der wohl durch die erwähnte schwache Erleuchtung der Netzhaut veranlaßt sein mochte. Durch kleine Bewegungen des Spiegels konnte er das Lichtbildchen von einer Seite nach der anderen über die Eintrittsstelle des Sehnerven wandern lassen, und niemals trat Lichtwahrnehmung ein, ehe nicht ein Teil der Flamme deutlich die Grenze überschritt, und so eine Stelle erreichte, wo die verschiedenen Schichten der Netzhaut schon vorhanden sind. Hieraus folgt, daß der blinde Fleck der ganzen Eintrittsstelle des Sehnerven, und namentlich nicht etwa bloß den eintretenden Gefäßen entspricht.

Denselben Versuch hat später Coccius[2] an dem eigenen Auge des Beobachters auszuführen gelehrt, wodurch er noch belehrender wird. Man braucht dazu einen durchbohrten Spiegel, plan oder konvex, wie er in den Augenspiegeln üblich ist, und hält diesen nahe vor das eigene Auge, während durch die Öffnung des Spiegels das Licht einer Lampe in das Auge fällt. Richtet man zunächst das Auge gerade nach dem Rand der Öffnung hin, so gelingt es leicht, das umgekehrte rote Flammenbildchen auf der Netzhaut des eigenen Auges zu sehen, und indem man dann das Auge mehr und mehr einwärts dreht, während man das Flammenbildchen festzuhalten sucht, gelingt es endlich das Flammenbild auf die Eintrittsstelle des Sehnerven zu bringen und die be-

[1] Onderzoekingen gedaan in het Physiol. Labor. d. Utrechtsche Hoogeschool. VI. 134.

[2] Über Glaukom, Entzündung und die Autopsie mit dem Augenspiegel. Leipzig 1859. S. 40 und 52.

schriebenen Beobachtungen anzustellen. Für diesen Zweck ist es übrigens ratsam, die Flamme klein zu machen, oder weit zu entfernen, weil sonst die große Menge Licht, die in das Auge dringt, hinderlich ist. Man sieht dabei auch die Gefäßstämme, hat aber natürlich immer nur ein sehr kleines Gesichtsfeld. Nimmt man eine größere Flammenfläche, so wird das Auge zu sehr geblendet, als daß man viel sehen könnte. Ist die Lichtmenge, welche auf die Eintrittsstelle des Sehnerven fällt, bedeutend, so nimmt das Auge allerdings einen schwachen Lichtschein wahr, aber, wie wir aus diesen Versuchen schließen müssen, nur deshalb, weil ein Teil des Lichtes sich auf die anstoßenden Teile der Netzhaut ausbreitet. Zuweilen entsteht auch bei solchen Versuchen ein roter Lichtschimmer im Auge, wohl wenn ein Gefäßstamm auf der Sehnervenfläche stark erleuchtet wird und Licht reflektiert. Dies beobachteten A. Fick und P. du Bois-Reymond, wenn sie das Sonnenbildchen einer Konvexlinse als Objekt benutzten.

Die Form und scheinbare Größe des blinden Flecks im eigenen Gesichtsfelde kann man leicht in folgender Weise bestimmen. Man gebe dem Auge 8 bis 12 Zoll über einer weißen Papierfläche einen festen Standpunkt, und zeichne zuerst auf dem Papier ein Kreuzchen als Fixationspunkt für das Auge. Dann führe man die in Tinte getauchte Spitze einer weißen oder mindestens hell gefärbten Feder auf dem Papiere in die Projektion des blinden Flecks hinein, so daß die schwarze Spitze verschwindet, und schiebe sie dann von dessen Mittelpunkte aus nacheinander in den verschiedenen Richtungen gegen die Peripherie des Flecks vor, und zeichne die Grenze auf, wo sie anfängt sichtbar zu werden. In dieser Weise habe ich in Fig. 2 den blinden Fleck meines rechten Auges, bezogen auf den Fixationspunkt $a$, dargestellt. $AB$ ist der dritte Teil der zugehörigen Entfernung des Auges von der Papierfläche. Man sieht, daß die Gestalt des Fleckes eine unregelmäßige Ellipse ist, an der ich selbst wie Hueck die Anfänge von den stärkeren Gefäßstämmen erkennen kann, welche austreten. Wenn man einen kleinen schwarzen Fleck auf das Papier macht, und nacheinander verschiedene Gesichtspunkte fixiert, so findet man noch, daß die Fortsetzungen der Gefäße weit in das Feld der Netzhaut hinein blinde Stellen sind. Am leichtesten gelingt dies, wenn man nach Coccius sich die Richtung der Gefäßstämme im eigenen Auge schon aufgesucht hat.

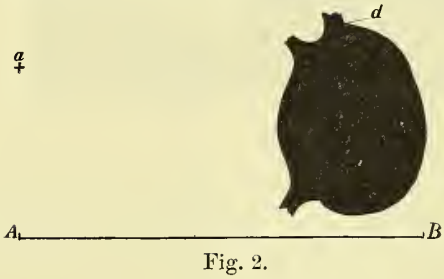


Fig. 2.

Bezeichnen wir die Entfernung des Auges vom Papier mit $f$, die Entfernung des zweiten Knotenpunkts von der Netzhaut, welche im Mittel 15 mm beträgt, mit $F$, den Durchmesser des blinden Flecks in unserer Zeichnung, oder irgend eine andere lineare Größe in der Zeichnung mit $d$, die entsprechende Größe auf der Netzhaut mit $D$, so haben wir

$$\frac{f}{F} = \frac{d}{D},$$

woraus wir $D$ berechnen können. Will man sich bei einer solchen Messung von der Größe $F$, welche für das individuelle Auge nie ganz genau bestimmt werden kann, unabhängig machen, so mißt man besser den Gesichtswinkel, d. h.

den Winkel zwischen den Richtungslinien (siehe Bd. I, 77), welche den verschiedenen Punkten der Zeichnung entsprechen. Wenn wir voraussetzen dürfen, die auf den Punkt $a$ der Fig. 2 gerichtete Gesichtslinie sei senkrecht zur Ebene der Zeichnung und die Entfernung $ad$ mit $\beta$ bezeichnen, den Gesichtswinkel, unter dem $ad$ erscheint, mit $\alpha$, so ist

$$\frac{\beta}{f} = \text{tg } \alpha,$$

woraus $\alpha$ berechnet werden kann; ebenso ist der Gesichtswinkel zwischen $a$ und jedem anderen Punkte der Zeichnung zu finden. Folgendes sind die Resultate, welche verschiedene Beobachter in dieser Weise erhalten haben:

1) Scheinbarer Abstand des Gesichtspunktes von dem ihm nächsten Teile des Randes des blinden Flecks: Listing[1] 12°37,5′; Helmholtz 12°25′; Th. Young 12°56′.
2) Scheinbarer Abstand des entferntesten Teils des Randes: Listing 18°33,4′; Helmholtz 18°55′; Th. Young 16°1′.
3) Scheinbarer Durchmesser des blinden Flecks in horizontaler Richtung: Hannover und Thomsen[2] bei 22 Augen 3°39′ bis 9°47′, Mittel aller Messungen 6°10′, Listing 5°55,9′; Griffin[3] im Maximo 7°31′; Helmholtz 6°56′; Th. Young, der nicht ganz zweckmäßig zwei Lichter gebraucht hatte, um die Grenze des Flecks zu finden, 3°5′.
4) Wahrer Durchmesser des blinden Flecks, mit Listings Wert für $F = 15$ mm berechnet, in Listings Auge 1,55 mm; Helmholtz 1,81. Hannover und Thomsen im Mittel 1,616 mm. Eine Messung von E. H. Weber des Durchmessers der Eintrittsstelle des Sehnerven in den Augen zweier Leichen ergab 2,10 mm und 1,72 mm (0,93 und 0,76 Par. Lin.). Der Abstand seiner Mitte von der Mitte des gelben Flecks war in dem einen Auge 3,8 mm (1,69 Par. Lin.); derselbe, in Listings Auge berechnet, 4,05 mm. Der größte und kleinste Durchmesser des Gefäßstrangs in der Mitte des Nerven waren 0,313 und 0,139 Lin., der größte in dem anderen Auge 0,28 Lin.

Aus diesen Messungen konnte schon vor den Versuchen von Donders geschlossen werden, daß die ganze Eintrittsstelle des Sehnerven unempfindlich gegen das Licht sei.

Um die scheinbare Größe des blinden Flecks im Gesichtsfelde noch anders zu bezeichnen, wollen wir anführen, daß auf seinem Durchmesser nebeneinander 11 Vollmonde Platz haben würden, und daß in ihm ein 6 bis 7 Fuß entferntes menschliches Gesicht verschwinden kann.

Daß die Sehnervenfasern im Stamme des Sehnerven nicht durch Licht in Reizung versetzt werden können, geht aus den beschriebenen Erscheinungen des blinden Flecks hervor. Daß auch ihre Fortsetzungen, welche von der Eintrittsstelle des Sehnerven über die vordere Fläche der Netzhaut hin ausstrahlen, gegen Licht unempfindlich sind, kann aus dem Umstande geschlossen werden, daß wir begrenzte helle Stellen des Gesichtsfeldes auch wirklich begrenzt sehen. Wenn Licht auf irgend eine Stelle $A$ der Netzhaut fällt, so trifft

[1] Berichte der Königl. sächs. Ges. der Wiss. 1852. S. 149. Ebenda die Beobachtungen von E. H. Weber.

[2] A. Hannover, Bidrag til Øjets Anatomie. Kjöbenhavn. Cap. VI. S. 61.

[3] Griffin, *Contributions to the physiology of vision.* London, Medical Gazette. 1838 Mai. p. 230.

es hier nicht bloß diejenigen Nervenfasern, welche in *A* endigen, sondern auch solche, welche über *A* hinausgehen, und an den mehr peripherisch gelegenen Stellen der Netzhaut endigen. Da nun der Ort, an welchem eine Nervenfaser gereizt worden ist, in der Empfindung nicht unterschieden wird, so würde dadurch für die Empfindung derselbe Erfolg eintreten, als wäre Licht auf jene peripherischen Stellen der Netzhaut gefallen. Wir würden unter diesen Umständen von jedem erleuchteten Punkte einen Lichtschweif nach den Grenzen des Gesichtsfeldes sich hinziehen sehen, was nicht der Fall ist. Es können also auch die vor der Netzhaut ausgebreiteten Fasern des Sehnerven nicht durch objektives Licht reizbar sein.

Daß dagegen die hinteren Schichten der Netzhaut gegen Licht empfindlich sind, geht daraus hervor, daß man den Schatten der Netzhautgefäße wahrnehmen kann (Bd. I, S. 182). Die Netzhautgefäße liegen in der Schicht der Sehnervenfasern, die feineren zum Teil auch noch in der unmittelbar dahinter liegenden Schicht der Nervenzellen (6 in Fig. 14, Bd. I, S. 22) und in der fein granulierten Schicht (ebenda 5). Aus den Bewegungen des Schattens dieser Gefäße bei Bewegungen der Lichtquelle haben wir geschlossen, daß die den Schatten empfindende Schicht, die Schicht, in welcher das den Schatten begrenzende Licht Nervenerregung hervorruft, in geringer Entfernung hinter den Gefäßen liegen müsse. Die Messungen von H. Müller (Bd. I, S. 189) ergeben, daß die Entfernung der Gefäße von der Fläche, die ihren Schatten empfindet, zwischen 0,17 und 0,36 mm betragen muß. Die Entfernung der Gefäße von der hintersten Schicht der Netzhaut, der der Stäbchen und Zapfen beträgt nach demselben Beobachter 0,2 bis 0,3 mm, so daß die empfindende Schicht jedenfalls eine der hintersten Schichten der Netzhaut sein muß, d. h. die Schicht der Zapfen und Stäbchen, oder die äußere Körnerschicht. Da an der Stelle des deutlichsten Sehens, in der zentralen Grube des gelben Flecks nach den Beobachtungen von Remak und Koelliker nur Nervenzellen und Zapfen vorkommen, so scheinen die letzteren die eigentlich empfindenden Elemente zu sein.* H. Müller und Koelliker sprechen auch die Stäbchen als solche an,

* An Stelle des hier folgenden Textes bis zum nächsten Absatz (S. 215, 1. Aufl.) steht in der 2. Aufl. ein kürzerer, in dem bezüglich der Funktion der Stäbchen eine andere Auffassung als in der 1. Aufl. vertreten wird. Es heißt dort (S. 255): „Bei der ganz analogen anatomischen Bildung der Stäbchen ist es höchst wahrscheinlich, daß auch diese die genannte Fähigkeit besitzen, wie schon H. Müller und Koelliker ausgesprochen haben. Indessen müssen sie bei der Lokalisation der Empfindungen eine ganz andere Rolle spielen, da trotz ihrer größeren Feinheit und Anzahl dort, wo sie überwiegend vorkommen, in den peripherischen Teilen der Netzhaut, das Unterscheidungsvermögen für noch benachbarte Eindrücke im Gegenteil unvollkommener ist, als in der Netzhautgrube.

Da die Untersuchung über die Feinheit der Wahrnehmung von Ortsunterschieden beim Sehen wesentlich mit der Frage zusammenhängt, welche Elemente der Netzhaut lichtempfindlich sind, (das heißt hier immer: bei Lichteinwirkung Empfindung erregen) und wie sie mit den Nervenfasern zusammenhängen, so wenden wir uns zunächst dieser Frage zu.

Da diejenige Stelle der Netzhaut, welche der feinsten Ortsunterscheidung fähig ist, ein regelmäßig gebildetes Mosaik voneinander trennbarer Teile, der Zapfen, hat, von denen jeder einzelne mit einer Nervenfaser zusammenhängt, die zunächst zu den Nervenzellen der Netzhaut hinüberführt, so scheint die Annahme nicht unwahrscheinlich, daß jeder einzelne Zapfen seine eigene abgesonderte Nervenleitung zum Gehirn hat und daß dementsprechend die in ihm erregte Empfindung von qualitativ gleicher Empfindung in den benachbarten Zapfen unterschieden werden könne."

Über die neueren Auffassungen bezüglich des funktionellen Unterschiedes von Stäbchen und Zapfen vergleiche den Zusatz nach § 25. N.

weil diese mit ähnlichen senkrecht durch die Netzhaut verlaufenden Fasern zusammenhängen wie die Zapfen. Indessen scheint dieser Annahme, wie E. H. Weber bemerkt hat, die Tatsache zu widersprechen, daß an der Stelle des deutlichsten Sehens nur Zapfen vorkommen, während gegen die Peripherie der Netzhaut hin, wo sich immer mehr Stäbchen zwischen die Zapfen einschieben, das Sehvermögen immer unvollkommener wird. Wären die Stäbchen empfindende Elemente, so müßte man im Gegenteil folgern, daß die Empfindlichkeit und die Genauigkeit der Wahrnehmung größer sein müßte, wo die Zahl der Stäbchen größer ist, weil von diesen mehr auf demselben Flächenraume enthalten sind als von den Zapfen. Der Zusammenhang mit radialen Fasern kann nichts für die nervöse Natur der Stäbchen beweisen, da ein großer Teil der radialen Fasern sich an die *Membrana limitans* befestigt, und es daher äußerst wahrscheinlich ist, daß dies Bindegewebsfasern, aber nicht Nervenfasern sind. Indem wir hier davon gesprochen haben, daß die hintere Schicht der Netzhaut und speziell die Zapfen die letzten das Licht empfindenden Elemente des Sehnervenapparats seien, so ist dies natürlich nur in dem Sinne geschehen, daß in diesen Gebilden das äußere Licht Veränderungen erregt, welche Nervenerregung und, wenn diese dem Gehirne zugeleitet ist, schließlich Empfindung zur Folge haben. Wir können sogar nicht verkennen, daß die lichtempfindlichen Elemente der Netzhaut, wie wir sie nennen mögen, ähnlich wie man ja auch in der Photographie von einer lichtempfindlichen Fläche spricht, sich funktionell eben durch diese Lichtempfindlichkeit von allen anderen Teilen des Nervensystems unterscheiden, ebenso wie sie es andererseits durch manche Eigentümlichkeiten ihres anatomischen Baues tun. Weiter folgt denn nun auch, daß die Wirkung des Lichts auf die eigentliche Nervensubstanz der Netzhaut und des Sehnerven keine unmittelbare ist, wie die der Elektrizität und der mechanischen Eingriffe, wodurch in jeder Nervenfaser an jeder Stelle ihres Verlaufs die Molekularveränderungen eingeleitet werden können, welche den Vorgang der Reizung konstituieren. Die Wirkung des Lichts ist vielmehr eine mittelbare. Direkt wirkt das Licht nur auf die besonderen lichtempfindlichen Apparate, die Zapfen. Es fehlen uns freilich noch alle Anhaltepunkte, um zu unterscheiden, welcher Art diese Wirkung ist, und welcher Grad von Ähnlichkeit zwischen ihr und der Nervenreizung besteht, ob eine Vibration hervorgerufen wird, wie Newton[1], Melloni[2], Seebeck[3] und andere Physiker voraussetzten, ob eine Umlagerung der Moleküle in der Weise, wie sie die elektromotorischen Moleküle der Muskeln und Nerven nach E. du Bois-Reymond erleiden, ob eine Erwärmung nach Drapers[4] Ansicht, oder ob diese lichtempfindliche Schicht der Netzhaut etwa ein photochemischer Apparat ist, entsprechend Mosers[5] Annahme. Erst sekundär ist die Folge dieser Veränderungen Reizung derjenigen Nervenfasern, welche mit den Zapfen, auf die das Licht gewirkt hat, zusammenhängen.

Mit der Größe der vom Lichte direkt affizierten Netzhautelemente hängt auch der Grad der Genauigkeit zusammen, den das Sehen erreichen kann. Das Licht, was auf ein einziges empfindendes Element fällt, kann nur eine einzige Lichtempfindung hervorbringen, in der nicht mehr unterschieden wird, ob

[1] Optice. Lib. III. Quaestio XVI.
[2] Pogg. Ann. LVI. 574.
[3] Ebenda. LXII. 571.
[4] *Human Physiology.* p. 392.
[5] Pogg. Ann. LVI. 177.

einzelne Teile des Elements stark, andere schwach erleuchtet sind. Es können lichte Punkte wahrgenommen werden, deren Netzhautbild sehr viel kleiner ist, als ein empfindendes Netzhautelement, vorausgesetzt, daß die Lichtmenge, die von ihnen in das Auge fällt, groß genug ist, ein Netzhautelement merklich zu affizieren. So werden z. B. die Fixsterne, als Objekte von großer Lichtstärke, trotz ihrer verschwindend kleinen scheinbaren Größe, vom Auge wahrgenommen. Ebenso können auch dunkle Objekte auf hellem Grunde wahrgenommen werden, obgleich ihre Bilder kleiner sind, als ein empfindendes Nervenelement, vorausgesetzt nur, daß die Lichtmenge, welche auf das Element fällt, durch das dahin treffende dunkle Bild um einen wahrnehmbaren Teil verringert wird. Kann das Auge z. B. bei der angewendeten Beleuchtungsstärke Unterschiede der Lichtintensität von $^1/_{50}$ erkennen, so würde ein dunkles Bildchen, dessen Flächeninhalt $^1/_{50}$ von dem eines empfindenden Elements ist, noch wahrgenommen werden können. Dagegen ist es klar, daß zwei helle Punkte nur dann als zwei erkannt werden können, wenn der Abstand ihrer Bilder größer ist, als die Breite eines Netzhautelements. Wäre er kleiner, so würden beide Bilder immer auf dasselbe oder auf zwei benachbarte Elemente fallen müssen. Im ersteren Falle würden beide nur eine einzige Empfindung erregen, im zweiten Falle zwar zwei Empfindungen, aber in benachbarten Nervenelementen, wobei nicht unterschieden werden könnte, ob zwei gesonderte Lichtpunkte, oder einer da ist, dessen Bild auf die Grenze beider Elemente fällt. Erst wenn der Abstand der beiden hellen Bilder, oder wenigstens ihrer Mitte voneinander größer ist, als die Breite eines empfindenden Elements, erst dann können die beiden Bilder auf zwei verschiedene Elemente fallen, die sich gegenseitig nicht berühren, und zwischen denen ein Element zurückbleibt, welches nicht oder wenigstens schwächer als die beiden ersten von Licht getroffen wird.

Nach den Angaben von Hooke[1] erscheinen zwei Sterne, deren scheinbare Entfernung weniger als 30 Sekunden beträgt, stets wie ein Stern, und von Hunderten kann kaum einer die beiden Sterne unterscheiden, wenn ihre scheinbare Entfernung weniger als 60 Sekunden beträgt. Die übrigen Beobachter, welche nicht an Sternen, sondern an weißen beleuchteten Strichen oder Vierecken ihre Beobachtungen angestellt haben, fanden eine etwas geringere Genauigkeit. Es wurden von dem besten, von E. H. Weber untersuchten Auge zwei weiße Striche unterschieden, deren Mittellinien 73 Sekunden voneinander entfernt waren. Bei stärkerer Beleuchtung komme ich selbst unter möglichst günstigen Umständen bis 64 Sekunden. In Listings schematischem Auge entspricht auf der Netzhaut

| ein Gesichtswinkel von | einem Abstande von |
|---|---|
| 73″ | 0,00526 mm |
| 63″ | 0,00464 „ |
| 60″ | 0,00438 „ |

Nach Koellikers Messungen beträgt die Dicke der Zapfen im gelben Flecke 0,0045 bis 0,0054 mm, was fast genau mit den vorigen Zahlen übereinstimmt, so daß auch durch diese Messungen die Annahme, daß die Zapfen die letzten empfindenden Elemente der Netzhaut bilden, bestätigt wird*.

[1] Smiths Optik, übers. v. Kaestner. S. 20.

* Vgl. Nachtrag auf S. 35. N.

Gleichzeitig ergibt sich, daß die optische Beschaffenheit eines gut gebauten und richtig akkommodierten Auges vollkommen genügt, um den Grad von Genauigkeit, welchen die Größe der nervösen Elemente möglich macht, auch wirklich zu erreichen. Wir haben freilich (§ 13, S. 151) gefunden, daß bei einem Durchmesser der Pupille von 4 mm der durch Farbenzerstreuung erzeugte Zerstreuungskreis einen Durchmesser von 0,0426 mm hat, also fast 10 mal größer ist, als die Dicke der Zapfen, aber dort auch schon die Gründe angegeben, warum diese Zerstreuungskreise trotz ihrer Größe das Sehen nicht erheblich beeinträchtigen. Die Abweichungen wegen Asymmetrie des Auges (§ 14, S. 168) sind meist viel geringer, und beeinträchtigen das Sehen weniger, wenn nicht gleichzeitig horizontale und vertikale Linien gesehen werden sollen.

Auf den Seitenteilen der Netzhaut ist die Unterscheidungsfähigkeit viel geringer als im gelben Flecke, und zwar ist die Abnahme in der Nähe des Netzhautzentrums geringer, als in größerer Entfernung davon. Nach den Messungen von Aubert und Förster ist die Abnahme nach verschiedenen Richtungen hin vom Zentrum aus verschieden schnell, und zwar geschieht sie nach oben und unten am schnellsten, nach der äußeren Seite der Netzhaut hin am langsamsten; dabei scheinen die individuellen Unterschiede ziemlich bedeutend zu sein. Ein auffallendes Resultat ihrer Messungen ist auch, daß bei der Akkommodation für die Ferne die Abnahme nach den Seiten der Netzhaut hin schneller zu geschehen scheint, als beim Nahesehen. Sie fanden, daß eine ähnliche Abnahme der Genauigkeit der optischen Bilder wenigstens in Kaninchenaugen nach den Seiten der Netzhaut hin nicht stattfindet. Dadurch wird konstatiert, daß die Unvollkommenheit des Sehens auf den seitlichen Netzhautteilen nur von der Beschaffenheit der Netzhaut, nicht von der der optischen Bilder abhängt.

Als Objekt für die Feststellung der kleinsten zu unterscheidenden Distanzen hat Tob. Mayer und nach ihm E. H. Weber weiße parallele Linien benutzt, welche durch gleich breite schwarze getrennt waren, Volkmann benutzte Spinnwebfäden auf hellem Grunde, ich selbst fand der Beleuchtung wegen passender ein Gitter von schwarzen Drähten zu benutzen, dessen Zwischenräume gleich dem Durchmesser der Drähte waren, und welches vor den hellen Himmel gestellt wurde. Außerdem hat Tob. Mayer auch weiße Vierecke benutzt, teils durch ein schwarzes Gitter getrennt, teils schachbrettartig geordnet.

Man muß bei der Anstellung der Versuche darauf achten, daß das Auge vollständig akkommodiert werden könne, und wenn man gröbere Objekte benutzt, und sich daher weiter entfernen muß, ein passendes Konkavglas vor das Auge nehmen. Die Beleuchtung muß stark sein, ohne doch blendend zu werden. Bei diesen Versuchen bemerkte ich eine auffallende Formveränderung der geraden hellen und dunkeln Linien. Die Breite jedes hellen und jedes dunkeln Streifen des von mir gebrauchten Gitters betrug $\frac{13}{24} = 0{,}4167$ mm. In dem Abstande von 1,1 bis 1,2 m fing die Erscheinung an sichtbar zu werden. Das Gitter bekam etwa das Ansehen wie in Fig. 3 *A*, die weißen Streifen erschienen zum Teil wellenförmig gekrümmt, zum Teil perlschnurförmig mit abwechselnd dickeren und dünneren Stellen. Es seien in Fig. 3 *B* die kleinen Sechsecke Querschnitte der Zapfen des gelben Flecks *a*, *b* und *c* drei optische Bilder von den gesehenen Streifen, diese sind oberhalb *d d* in ihrer wirklichen Form dargestellt, unterhalb *d d* aber sind alle Sechsecke, deren größere Hälfte schwarz war, ganz

schwarz gemacht, deren größere Hälfte weiß war, ganz weiß, weil in der Empfindung immer nur die mittlere Helligkeit jedes Elements wahrgenommen werden kann. Man sieht, daß dadurch in der unteren Hälfte von Fig. 3 *B* ähnliche Muster entstehen, wie in *A*. Purkinje[1] hat Ähnliches gesehen, und auch Bergmann hat beobachtet, daß zuweilen, ehe die Streifen des Gitters ganz verschwinden, dasselbe schachbrettartig erscheint, zuweilen Streifen in querer Richtung gegen die wirklich vorhandenen gesehen werden, was sich alles durch ähnliche Verhältnisse, wie die hier berührten, erklären läßt[2].

Wenn bei den Beobachtungen zwei leuchtende Objekte benutzt worden sind, deren Breite gegen ihren Abstand verschwindet, so können sie als zwei nur erkannt werden, wenn zwischen den Netzhautelementen, welche ihre Bilder empfangen, ein anderes zurückbleibt, welches dunkel bleibt. Der Durchmesser eines solchen Elements muß also jedenfalls kleiner sein, als der Abstand der beiden hellen Bilder. Ist die Breite der Objekte aber gleich dem dunkeln Streifen zwischen ihnen, so ist es nicht gerade nötig, daß die Netzhautelemente schmaler seien, als das Bild des dunkeln Streifens. Ein Netzhautelement, welches von dem Bilde des dunkeln Streifens getroffen wird, und mit seinen Seitenrändern noch zum Teil in die hellen Streifen hineinragt, wird deshalb doch noch weniger Licht als seine Nachbarn empfinden können, vorausgesetzt, daß die ganze Lichtmenge, von der es getroffen wird, kleiner ist, als die der Nachbarn. Wir können in solchen Fällen deshalb mit Gewißheit nur soviel folgern, daß die Netzhautelemente kleiner seien als die Entfernung der Mittellinien der hellen Streifen. Auch zeigt sich in der Tat in den auf S. 33 angeführten Versuchen von Tob. Mayer, daß bei parallelen Linien die Unterscheidbarkeit dieselbe bleibt, wenn sich die Breite des Schwarz oder Weiß ändert, aber die Summe der Breite eines schwarzen und eines weißen Streifens konstant bleibt. Deshalb habe ich als Breite des Objekts immer die Summe angegeben, welche der Entfernung der Mittellinien zweier benachbarter Objekte gleich ist, abweichend von Mayer und Weber, und danach auch den kleinsten Gesichtswinkel berechnet.

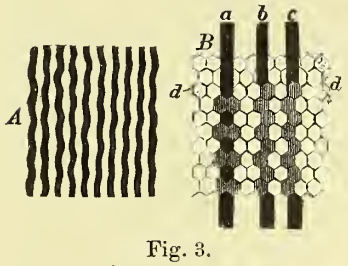


Fig. 3.

Daß die Grenze des Erkennens bei meinem eigenen Auge etwas weiter hinausgerückt ist, als bei den übrigen Augen Erwachsener, erkläre ich mir durch die hellere Beleuchtung, welche bei meinem Stabgitter möglich war. Das genaueste Auge, von Bergmann beobachtet, war das eines Knaben von 10 Jahren. Über den Einfluß der Erleuchtung hat Tob. Mayer Versuche angestellt. Er fand, daß Liniensysteme am besten erkannt wurden bei der Beleuchtung recht hellen Tageslichts, daß Steigerung der Helligkeit nichts nützte. Geringere Grade von Helligkeit erzeugte er des Nachts, indem er ein Licht in verschiedenen Entfernungen vor das Papier setzte. Je größer die Entfernung des Lichts, desto mehr mußte er sich nähern. Während das Licht aus $^1/_2$ Fuß Entfernung allmählich auf 13 Fuß gebracht wurde, wuchs der Gesichtswinkel für weiße Streifen mit gleich breiten Zwischenräumen (wie oben gerechnet) von 138″ auf

[1] Beobachtungen und Versuche. I. 122.
[2] Henle und Pfeufer. Zeitschrift für ration. Medizin. (3.) II. 88.

| Beobachter | Objekt | Größe des Objekts | Entfernung vom Auge | Entferung dividiert durch Größe des Objekts | Gesichtswinkel in Sekunden |
|---|---|---|---|---|---|
| 1. Hooke . . | Fixsterne . . . . . | — | — | — | 60 |
| 2. Tob. Mayer | a) Parallele Linien mit gleichen Zwischenräumen . . . . . | 0,72 Par. Lin. | 11 Par. Fuß | 2200 | 94 |
| | b) Ebensolche mit breiteren und schmaleren Zwischenräumen . . | 0,6 | $9^1/_2$ | 2275 | 90 |
| 3. Derselbe . | Weiße Quadrate durch ein schwarzes Gitter getrennt . . . . . | 0,88 | $15^1/_2$ | 2422 | 80 |
| 4. Derselbe . | Schachbrettmuster . . | 1,04 | 12 | 1661 | 124 |
| 5. Volkmann . | Spinnwebfäden . . . . | 0,0052 Par. Zoll. | 7 Par. Zoll. | 1346 | 147,5 |
| 6. N. N. bei Volkmann . | Dieselben . . . . . | — | 13 | 2500 | 80,4 |
| 7. Th. Weber bei E. H. Weber . . | Parallele Linien mit gleich breiten Zwischenräumen | 0,05 Par. Lin. | $110^1/_2$ Par. Lin. | 2210 | 90,6 |
| 8. N. N. 1 bei demselben . | Dieselben . . . . . | — | 138 | 2760 | 73 |
| 9. N. N. 2 bei demselben . | Dieselben . . . . . | — | $110^1/_2$ | 2210 | 90,6 |
| 10. Helmholtz . | Stabgitter . . . . . | 1,083 mm | 3500 mm | 3235 | 63,75 |
| 11. O. H. bei demselben . | Dasselbe . . . . . | — | 2400 | 2215 | 93 |
| 12. Bergmann . | Parallele Linien mit gleich breiten Zwischenräumen | 2 mm | 5500 bis 8000 | 2750 4000 | 75 51,6 |

344″, und er bildet sich die empirische Formel, welche seinen Messungen ziemlich gut entspricht, $s = 158'' \sqrt[3]{a}$, wo $s$ der Gesichtswinkel und $a$ die Entfernung des Lichts. Da nun die Helligkeit $h = \frac{1}{a^2}$ folgert er weiter $s = \frac{158}{\sqrt[6]{h}}$.

*Nachtrag von Helmholtz aus der 1. Auflage.*

Herr A. Volkmann hat neue Versuche veröffentlicht, aus denen er schließt, daß die Zapfen der Netzhautgrube nicht fein genug seien, um die wirklich stattfindende Sehschärfe des menschlichen Auges zu erklären. Die Hauptversuche sind mit zwei feinen Drähten ausgeführt, die vor hellem Grunde ausgespannt waren und mittels einer Mikrometerschraube so weit einander genähert werden konnten, bis der Zwischenraum zwischen ihnen dem Auge verschwand. Volkmann betrachtete diesen Zwischenraum als das kleinste sichtbare Objekt, und zog von seiner wirklichen Breite noch die Irradiationssäume ab, durch welche die Breite der Drähte scheinbar vergrößert wird. Dadurch erhielt er außerordentlich kleine Werte für die kleinsten Bilder, welche sehr viel kleiner erschienen als die Zapfen der Netzhaut. Ich muß ihm gegenüber aber festhalten, was ich oben auf S. 217 auseinandergesetzt habe, daß aus derlei Versuchen nicht folgt, daß die empfindenden Elemente der Netzhaut kleiner als das

Bild des Zwischenraums der Fäden seien, sondern nur, daß sie kleiner seien als die Distanz von der Mitte des einen dunklen Streifen bis zur Mitte des andern; und die letzteren Distanzen sind auch bei Volkmanns Versuchen nicht merklich kleiner, als sie früher von andern Beobachtern immer gefunden worden sind.

Herr Dr. Hirschmann hat die Versuche mit Systemen paralleler Drähte, wie sie oben auf S. 32 beschrieben sind, mit vielen Variationen wiederholt, um die günstigsten Bedingungen herauszufinden, und ist dabei ebenfalls bis zu Werten von etwa 50 Sekunden Gesichtswinkel gekommen, welches auf der Netzhaut einer Breite von 0,00365 mm entspricht. Nun ist aber nach den neuesten Messungen der Durchmesser der Zapfen in der Netzhautgrube

| | | | |
|---|---|---|---|
| nach | M. Schultze | 0,0020 bis | 0,0025 |
| „ | H. Müller | 0,0015 „ | 0,0020 |
| „ | Welcker | 0,0031 „ | 0,0036. |

Die Zapfen wären hiernach also fein genug, um der Genauigkeit der genannten Wahrnehmungen zu entsprechen.

Bei anderen Versuchen hat Volkmann Buchstaben, Ziffern und andere Formen von Objekten betrachtet und sucht es wahrscheinlich zu machen, daß die Anzahl der Zapfen, auf welche das Bild dieser Objekte fällt, nicht groß genug sei, um die betreffenden Formen unterscheiden zu können. Dabei scheint mir aber noch in Betracht zu kommen, daß wenn das Auge sich bewegt, das Bild eines Buchstaben sich nacheinander auf verschiedenen Gruppen von Zapfen und in relativ verschiedener Lage zu den einzelnen Zapfen abbilden kann, und daß Unterschiede, die in der einen Lage des Bildes vielleicht verschwinden, in einer andern deutlich werden können.

Ich glaube deshalb nicht, daß wir gezwungen sind die Ansicht, daß die Zapfen der Netzhaut die empfindenden Elemente seien, aufzugeben. Andererseits kann nach den neuesten Beobachtungen von M. Schultze in Betracht kommen, daß die gegen die Aderhaut gewendeten und durch schwarzes Pigment voneinander getrennten, stabförmigen Enden der Zapfen des gelben Flecks nur 0,00066 mm messen, und sie vielleicht allein, nicht die ganzen Zapfen, die empfindlichen Elemente sind.

Die ärztlichen Bestimmungen der Sehschärfe werden in der Regel mit Buchstaben von verschiedener Größe ausgeführt, welche man aus größerer Entfernung und mit passender Unterstützung der Akkommodation durch Brillengläser betrachten läßt. Als Maß der Sehschärfe eines Auges benutzt man einen Bruch, dessen Zähler der Abstand ist, in welchem jene Buchstaben noch gelesen werden konnten, dessen Nenner dagegen die Entfernung ist, aus der sie unter einem Winkel von 5 Winkelminuten erscheinen. Die letzteren Entfernungen sind bei Buchstabenproben, welche Snellen veröffentlicht hat, schon angegeben.

Im Durchschnitt findet sich nach Vroesom de Haan diese Genauigkeit im 10. Lebensjahre gleich 1,1, im 40. gleich 1,0, im 80. gleich 0,5 und nimmt überhaupt mit steigendem Lebensalter kontinuierlich ab.

Nach den Beobachtungen von E. Javal ist aber bei Korrektion des Astigmatismus und guter Beleuchtung (gleich der von 500 Kerzen in 1 m Entfernung) die Genauigkeit des Sehens um $^1/_4$ bis $^1/_3$ größer als de Haan angab.

*Zusatz von W. Nagel.*

Wenn die Bestimmung der Sehschärfe unter freiem Himmel oder bei recht guter künstlicher Beleuchtung vorgenommen wird, findet man schon bei Verwendung der erwähnten Snellenschen Probebuchstaben die Sehschärfe im Durchschnitt größer als 1. Da die einzelnen Buchstaben sehr ungleich leicht erkennbar sind, verwendet man jetzt häufig an ihrer Stelle Hakenfiguren in der Gestalt eines E oder ⊏, an denen erkannt werden muß, auf welcher Seite die Figur offen ist. Wie bei der Snellenschen Buchstabenprobe wird diejenige Sehschärfe = 1 gesetzt, bei welcher die eben noch erkennbare Hakenfigur unter dem Gesichtswinkel von 5 Winkelminuten erscheint. Die Figuren selbst sind so konstruiert, daß jeder einzelne schwarze Strich $^1/_5$ der Gesamtbreite der Figur aufweist.

Bei der Untersuchung mit diesen Haken findet man höhere Werte für die Sehschäfe, als mit Buchstaben- und Zahlenproben, und zwar bei guter Beleuchtung oder unter freiem Himmel Durchschnittswerte von 1,5 bis 2,0 für normale Augen. Aber auch Sehschärfengrade bis zu 4 sind nicht selten, besonders bei manchen sogenannten „Naturvölkern", bei denen Sehschärfe 6 nach Beobachtungen von H. Cohn, Kotelmann und G. Fritsch sicher vorkommt.

Der Durchschnitt der Sehschärfenwerte ist nach Cohn bei Naturvölkern nicht merklich höher als bei Kulturvölkern, während die umfassenderen Untersuchungen von G. Fritsch doch eine deutliche, wenn auch nicht erhebliche Überlegenheit der Naturvölker erkennen lassen.

Nach den oben S. 30 angegebenen Zahlen entspricht im Listingschen schematischen Auge ein Winkel von 60″ einer Strecke von 0,00438 mm auf der Netzhaut. Bei einer Sehschärfe 5 nach Snellens Bezeichnung würde ein eben noch erkennbarer Buchstabe oder Haken gerade unter diesem Winkel von 60″ = 1′ erscheinen.

Wollte man die kleinsten Sehelemente in der Netzhaut, wie Helmholtz es auf Grund von Koellikers Messungen tat, zu 0,0045 mm Durchmesser annehmen, so müßte also in einem Auge von der Sehschärfe 5 die kleinste noch erkennbare Probefigur auf der Fläche eines einzigen Netzhautzapfens sich abbilden können, was die Erkennbarkeit der Form unverständlich erscheinen ließe. Nun sind aber, wie Helmholtz schon in seinem Nachtrag auf voriger Seite angibt, von H. Müller die Zapfen der Fovea wesentlich dünner gefunden worden, zu 0,0015 bis 0,002 (was auch den neuesten Messungen von G. Fritsch entspricht), und unter der Annahme so feiner Zapfen sind auch die neuerdings gefundenen hohen Sehschärfen werte von Cohn und Fritsch wenigstens für die einfachen ⊏-Figuren verständlich. N.

Die Untersuchungen von Aubert und Förster über die Genauigkeit des Sehens auf den Seitenteilen der Netzhaut sind nach zwei Methoden ausgeführt worden. Bei der ersten Methode blickte der Beobachter durch eine geschwärzte Röhre, welche fest aufgestellt war, dadurch die Stellung seines Auges sicherte und sein Auge vor blendendem Seitenlicht schützte, nach einem mit Buchstaben und Zahlen, die in gleichen Zwischenräumen voneinander standen, bedruckten Bogen (2 Fuß breit, 5 Fuß lang) hin. Dieser war auf zwei horizontale Walzen aufgerollt, so daß der vom Beobachter gesehene Teil nach jedem Versuch schnell gewechselt werden konnte. Da die aufgedruckten Buchstaben und Zahlen ferner ganz willkürlich durcheinander gestellt waren, konnte der Beobachter auch nie andere Zahlen erraten, als die er wirklich gesehen hatte. Vor dem Bogen stand eine Leydener Flasche, welche sich von Zeit zu Zeit entlud, und dadurch den Bogen auf einen Moment erhellte, während es in den Zwischenzeiten so dunkel war, daß der Beobachter eben nur den Ort der Buchstaben, aber nicht ihre Form erkennen konnte. Während ein Gehilfe den Bogen mit den Buchstaben beliebig stellte, gab der Beobachter nach jeder Beobachtung an, welche Buchstaben er erkannt hatte. Es wurden vier solche Bogen mit Ziffern und Buchstaben von verschiedener Größe gebraucht. Der Abstand des Beobachters von den Objekten konnte geändert werden.

Nennen wir mit Aubert den doppelten Winkel zwischen der Gesichtslinie und der Richtungslinie der äußersten gesehenen Buchstaben, d. h. also den Ge-

sichtswinkel des mit erkennbaren Zahlen besetzten Raumes, den Raumwinkel, und den Winkel, unter welchem die größten Dimensionen der gesehenen Buchstaben und Zahlen dem Beobachter erschienen, den Zahlenwinkel, so ergab sich, daß bei gleicher wirklicher Größe der Zahlen das Verhältnis des Zahlenwinkels zum Raumwinkel nahehin konstant war; nur bei Raumwinkeln über 30 oder 40° waren die Zahlenwinkel etwas größer, als dies Verhältnis erforderte. Dagegen fand sich, daß bei konstanter scheinbarer Größe der Zahlen kleine nahe Zahlen besser erkannt wurden als größere ferne. Es fand sich nämlich die Verhältniszahl des Raumwinkels dividiert durch den Zahlenwinkel, wie folgt:

| Wirkliche Größe der Zahlen in Millimeter | Grenze des Raumwinkels | Verhältnis des Zahlenwinkels dividiert durch den Raumwinkel | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Minimum | Maximum | Mittel |
| 26 | 25° | 7 | 7,9 | 7,18 |
| 26 | 40 | 6 | 7,3 | 6,69 |
| 13 | 27 | 11 | 12 | 11,14 |
| 7 | 27 | 9,7 | 14,5 | 12,79 |

In der zweiten Kolumne ist als Grenze des Raumwinkels derjenige Wert desselben angegeben, bis zu welchem die Messung ging, oder wenigstens nahehin konstante Verhältniszahlen lieferte. Die letzte Kolumne zeigt, daß das Verhältnis zwischen Zahlenwinkel und Raumwinkel steigt, wenn die wirkliche Größe der Zahlen sich verkleinert. Dieses letztere Faktum ist sehr rätselhaft. Sollte der Mechanismus der Akkommodation die peripherischen Teile der Netzhaut verändern? Aubert macht die Annahme, daß die Stäbchen beim Fernsehen in den Randteilen der Netzhaut sich schief stellen und dadurch den normalen Gang der Lichtstrahlen hemmen.

Die zweite Methode der Untersuchung wurde mittels des in Fig. 4 abgebildeten Apparats bei gewöhnlichem Tageslichte ausgeführt. *A* ist ein weiß lackierter Blechstreifen von 0,3 m Länge und 0,05 m Breite, welcher nach Art der Flügel einer Windmühle um die Achse *u* gedreht werden kann. Der Blechstreifen mit seiner Achse läßt sich an einer vertikalen Stahlstange *B* auf- und abschieben, welche auf einem Brettchen *C* befestigt ist. Am andern Ende des Brettchens, gegenüber der Achse des Blechstreifens, befindet sich das eine Auge des Beobachters, während sein anderes Auge durch den schwarzen Papierschirm *D* verdeckt ist, welcher an einem Holzstabe *d* so befestigt ist, daß er nach links und rechts gedreht werden kann. Die Achse des Blechstreifens ist 0,2 m von dem Mittelpunkte der Grundlinie beider Augen des Beobachters entfernt. Das Brettchen *C* hat unten eine Handhabe.

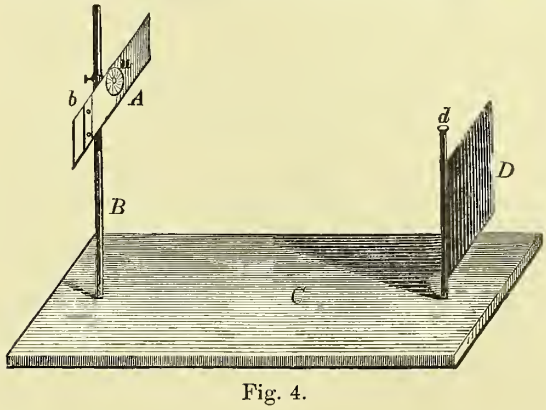


Fig. 4.

Bei den Versuchen legte der Beobachter die Nase an den Holzstab *d*, verdeckte mit dem Schirm das eine Auge, stützte sein Kinn auf das Brett vor dem Schirm und stellte die Achse der Blechtafel in gleiche Höhe mit den Augen. Nun fixierte er den Mittelpunkt der Tafel (oder die Spitze ihrer Achse) unverwandt, und schob allmählich von der Seite her in den Falzen der Blechtafel eine weiße Karte (*b*) mit 2 Punkten nach dem fixierten Punkte hin. Sobald er. bei ununterbrochen fester Fixation, mit den seitlichen Teilen der Retina die zwei Punkte unterschied, hielt er die Karte fest und las die Entfernung der beiden Punkte von dem Fixationspunkte an einer Metereinteilung, welche sich an den Falzen der Blechtafel befand, ab, und dies wurde für verschiedene Neigungen der Blechtafel gegen den Horizont ausgeführt. Die schwarzen Flecke auf der Karte waren rund, von verschiedener Größe und verschiedenem gegenseitigen Abstande. Beide Punkte standen immer gleich weit von der Drehungsachse ab.

Die Fig. 5 stellt die Resultate dieser Messungen für ein Paar schwarze Flecke von 2,5 mm Durchmesser und 14,5 mm gegenseitigen Abstand dar. Die ausgezogene Grenzlinie bezieht sich auf Auberts, die punktierte auf Försters Augen. Der Schnittpunkt der *Radii vectores* entspricht dem Fixationspunkte der Augen, die gezogenen *Radii vectores* selbst entsprechen den einzelnen Messungen und ihrer Richtung nach den verschiedenen Stellungen der Blechtafel. *O* bedeutet oben, *U* unten, *A* außen, d. h. Schläfenseite, *I* innen oder Nasenseite. Die Linie *a b* bezeichnet die entsprechende Entfernung des Auges von der Blechtafel, welche 0,2 m betrug. Alle Lineardimensionen sind auf $^1/_5$ reduziert[1]. Es stellen also diese Flächen zunächst diejenigen Teile des Gesichtsfeldes dar, innerhalb deren man zwei Punkte von der angegebenen Größe und Entfernung voneinander unterscheiden kann; will man die entsprechenden Flächen der Netzhaut haben, so muß man sie umkehren. Die unregelmäßig ovale Gestalt dieser Flächen zeigt beträchtlich individuelle Abweichungen selbst zwischen den beiden Augen derselben Person.

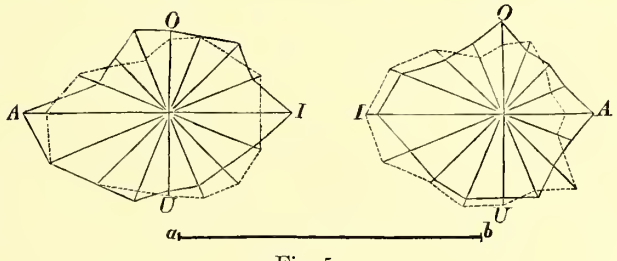


Fig. 5.

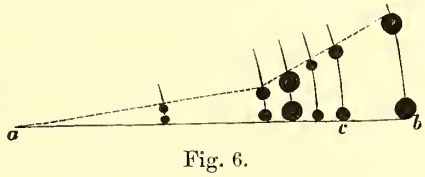


Fig. 6.

Die mittleren Resultate der Messungen an verschiedenen Paaren von schwarzen Flecken sind in Fig. 6 dargestellt. Der Fixationspunkt ist *a* und *a b*, *a c* sind die Mittel sämtlicher Entfernungen, welche bei allen vier Augen in je acht verschiedenen Meridianen für das bezüglich bei *b*, *c* usw. stehende Paar von Punkten an der Blechtafel eingestellt wurden. Bei *c* ist das Paar von Punkten, auf welche sich Fig. 5 bezieht. Man sieht, daß in größerer Entfernung die Breite des Objekts schneller zunehmen muß, als bei kleineren Entfernungen. Die gefundenen Mittelzahlen selbst sind folgende:

[1] Die Angabe Auberts, daß sie auf $^1/_4$ reduziert seien, paßt nicht zu den angegebenen Zahlen.

| Entfernung der Punkte in Millimeter | Durchmesser der Punkte in Millimeter | Mittlerer Abstand vom Zentrum der Blechtafel in Millimeter |
|---|---|---|
| 3,25 | 1,25 | 31 |
| 6,5 | 2,5 | 50 |
| 9,5 | 3,75 | 55 |
| 12 | 1,25 | 60 |
| 14,5 | 2,5 | 65 |
| 20,5 | 3,75 | 77 |

Bei diesen Versuchen fanden die beiden Beobachter übrigens auch öfters unempfindliche Stellen der Netzhaut, gleichsam kleine blinde Flecke, wo einer der Punkte oder beide plötzlich verschwanden. Außer solchen Stellen, wo nur eine vorübergehende Blendung stattzufinden schien, waren auch konstante vorhanden, die immer wieder zu finden sind.

Die Erscheinungen des blinden Flecks wurden von Mariotte entdeckt, der mit der Absicht an diese Versuche ging, zu untersuchen, welcher Art das Sehen auf der Eintrittsstelle des Sehnerven sei. Der Versuch erregte damals solches Aufsehen, daß er ihn 1668 vor dem Könige von England wiederholte. Picard gab dem Versuche eine Form, bei bei der man beide Augen offen halten kann, und doch eine Sache nicht sieht. Zu dem Ende befestigte er an einer Wand ein Papier, stellte sich in die Entfernung von etwa 10 Fuß davon, und ließ die Augen nach dem nah vor das Gesicht gehaltenen Finger konvergieren, so daß in beiden Augen das Bild auf den blinden Fleck fällt, und deshalb gar nicht gesehen wird, während es sonst unter diesen Umständen doppelt erscheint. Mariotte überbot ihn, indem er bei zwei offenen Augen zwei Objekte verschwinden ließ. Man befestigt an der Wand zwei Papiere gleich hoch, drei Fuß voneinander, stellt sich 12 bis 13 Fuß von der Wand entfernt, hält den Daumen etwa 8 Zoll weit vom Auge, so daß er dem rechten Auge das linke Papier, dem linken Auge das rechte Papier verdeckt, und fixiert den Daumen, dann verschwinden auch die beiden Papiere, weil sie in demjenigen Auge, dem sie nicht verdeckt sind, auf den blinden Fleck fallen. Le Cat versuchte auch schon die Größe des blinden Flecks auf der Netzhaut zu berechnen, wobei er ihn freilich viel zu klein, nämlich $^1/_5$ bis $^1/_4$ Linie fand. Daniel Bernouilli zeichnete seine Form auf den Fußboden, indem er eine Münze auf den Fußboden eines Zimmers legte, ein Pendel nahm, dessen eines Ende er an das rechte Auge hielt, und das andere den Boden fast berühren ließ. Das linke Auge verschloß er, mit dem rechten sah er am Pendel herunter, und suchte nun die Stellen auf dem Fußboden auf, wo die Münze anfing unsichtbar zu werden; er fand eine fast elliptische Figur. Die Berechnung der Größe des blinden Flecks auf der Netzhaut lieferte ihm aber wegen ungenügender Kenntnis der optischen Konstanten des Auges einen zu hohen Betrag, nämlich $^1/_7$ des Augendurchmessers.

Es knüpfte sich an die Entdeckung von Mariotte sogleich eine weitläufige Diskussion über eine Frage, die bei den damaligen geringen Kenntnissen der Nervenleistungen natürlich gleich entstehen mußte, nämlich die Frage, ob denn überhaupt die Netzhaut es sei, wie Keppler und Scheiner vorausgesetzt hatten, welche das Licht empfände. Mariotte schloß, daß es vielmehr die Aderhaut sei, denn diese fehlt im blinden Flecke, während die Fasern der Netzhaut dort gerade recht dicht zusammenliegen. In der Tat schlossen sich eine Reihe namhafter Optiker der Meinung von Mariotte an, wie Mery, Le Cat, Michell, unter den Neueren D. Brewster. Es wurde namentlich hervorgehoben, daß die Netzhaut das Licht wegen ihrer Durchsichtigkeit nicht zurückhalte, daß sie zu dick sei, um ein scharfes Bild zu geben; auch suchte Le Cat nachzuweisen, daß die Aderhaut eine Fortsetzung der *Pia Mater* des Gehirns sei. Die Lichtempfindlichkeit der Netzhaut wurde verteidigt durch

Pecquet, de la Hire, Haller, Porterfield, Perrault, Zinn. Der Hauptgrund für die Meinung dieser Männer war eigentlich immer nur, daß die Netzhaut die anatomische Entfaltung eines mächtigen Nerven ist, während die Aderhaut nur wenige dünne Nerven enthält. Was sie sonst von Gründen beibringen konnten, um ihre Meinung zu stützen und die Schwierigkeiten des Mariotteschen Versuchs zu beseitigen, war nicht viel wert. Porterfield nahm an, daß der Sehnerv. an seiner Eintrittsstelle noch von den sehnigen Nervenscheiden umgeben und durchzogen, nicht weich und zart genug sei, um ein so feines Agens, wie das Licht sei, zu empfinden. Haller hebt ebenfalls hervor, daß an der Eintrittsstelle des Sehnerven keine eigentliche Netzhaut vorhanden sei, sondern eine weiße zellulöse und poröse Haut, die zum Sehen untauglich sein könne, ohne daß die Netzhaut es sei. Andere, wie Rudolphi, anfangs auch Coccius, glaubten, daß die unempfindliche Stelle nur den Zentralgefäßen des Sehnerven entpräche, was aber widerlegt wurde, sobald man die optischen Konstanten des Auges besser kennen lernte, z. B. durch Hannover, E. H. Weber, A. Fick und P. du Bois-Reymond. J. Müller glaubte die Erscheinung durch die Annahme erklären zu können, daß die Mariottesche Erscheinung analog sei dem Verschwinden der Bilder gefärbter Objekte, die auf weißem Grunde liegen auf den Seitenteilen der Netzhaut, worauf wir in § 23 zurückkommen werden. Es geschieht dies durch Ermüdung der Netzhaut. Auf der Eintrittsstelle des Sehnerven, meinte er, geschehe es nur sehr viel schneller und plötzlicher. Dagegen ist einzuwenden, daß ein helles Objekt, welches in dem ungesehenen Raume des Gesichtsfeldes plötzlich auftaucht, gar nicht wahrgenommen wird, also auch die Sehsinnsubstanz gar nicht reizt, also auch nicht ermüden kann.

Die oben gegebenen notwendigen Folgerungen aus den Tatsachen stellte Referent im Jahre 1851 auf, und dehnte den Schluß, daß das objektive Licht unfähig sei, die Sehnervenfasern zu affizieren, auch gleich auf die an der vorderen Fläche der Netzhaut verlaufenden Fasern aus. Da ein anatomischer Zusammenhang der Stäbchenschicht mit den Nervenelementen der Netzhaut damals noch nicht bekannt war, so blieb nur die Annahme, daß die Nervenzellen oder Körner der Netzhaut die lichtempfindlichen Elemente seien. Bald darauf entdeckte H. Müller die Radialfasern der Netzhaut, welche die Zapfen und Stäbchen mit den Elementen verbinden. Koelliker wies dieselben am Menschen nach, und beide schlossen daran die Vermutung, daß die Elemente der Stäbchenschicht die lichtempfindlichen seien, für welche schließlich von H. Müller auch der physiologische Beweis gegeben wurde. Dieselbe Ansicht war übrigens, freilich ohne genügende Kenntnis der mikroskopischen Elemente, früher von Treviranus aufgestellt worden, der die lichtempfindlichen Elemente Nervenpapillen nannte.

Die Genauigkeit des Sehens hat man viel unterschätzt seit der Zeit, wo man anfing Teleskope zu bauen. Hooke wendete gleich zuerst das richtige Prinzip an, indem er untersuchte, bei welchem Winkelabstande Doppelsterne als solche erkannt werden können. Die meisten folgenden Beobachter dagegen suchten nach der kleinsten Größe eines schwarzen Flecks, der noch erkannt werden könnte, und erhielten natürlich sehr abweichende Resultate, so Hevelius, Smith, Jurin, Tob. Mayer, Courtivron, Muncke, Treviranus. Den Einfluß der Erleuchtung bei diesen Versuchen erkannten Jurin und Mayer. Ersterer glaubte die Tatsache, daß zwei Striche voneinander zu trennen, erst bei einem größeren Sehwinkel möglich sei, als jeden einzelnen von ihnen zu erkennen, daraus zu erklären, daß das Auge zitterte und deshalb die Bilder zweier Stäbe sich deckten. Die Gründe, warum nur die Trennung distinkter Objekte ein konstantes Maß geben kann, entwickelte Volkmann, und nach dieser Methode wurden Messungen von E. H. Weber, Bergmann, Marié Davy ausgeführt.

Blinder Fleck und Ort der lichtempfindlichen Schicht.

1668. Mariotte, *Oeuvres.* p. 496—516; ferner in *Mém. de l'Acad. de Paris 1669 et 1682. Phil. Transact.* II. 668. Acta Eruditorum 1683. p. 68.
1670. Pecquet, *Phil. Transact.* XIII. 171.
Perrault, ibid. XIII. 265.
1694. De la Hire, *Accidens de la vue.*
1704. Mery, *Hist. de l'Acad. de Paris.* 1704.
1709. De la Hire, ibid. 1709. p. 119. 1711. p. 102.
1728. D. Bernouilli, Comment. Petropol. vet. T. 1. p. 314.
1738. Smith, *Optics.* Cambridge 1738. Remarks. p. 6. (Deutsche Ausgabe 367.)
1740. Le Cat, *Traité des sens. Rouen.* p. 171. 176—180.
1755. Zinn, *Descriptio oculi humani.* p. 37.
1757. Haller, Physiologia. T. V. p. 357. 474.
1759. Porterfield, *On the eye.* II. 252. 254.
1772. Michell in Priestley, Geschichte der Optik. 4. Per. 5. Abt. 2. Kap. (Deutsche Ausgabe. S. 149.)
1819. Purkinje, Beobachtungen und Versuche. I. 70 und 83.
1835. D. Brewster, Poggendorffs Ann. XXIX. 339.
G. R. Treviranus, Beiträge zur Aufklärung der Erscheinungen und Gesetze des organ. Lebens. Bremen.
1838. Griffin, *Contributions to the physiology of vision.* London medical gazette. 1838 Mai. p. 230.
1840. J. Müller, Handbuch der Physiologie. II. 370.
1844. Valentin, Lehrbuch der Physiologie. 1. Ausgabe. II. 444.
1846. Volkmann, Art.: Sehen in Wagners Handwörterbuch der Physiol. III. 272.
1850. A. Hannover, Bidrag til Øjets Anatomie, Physiologie og Pathologie. Kjöbenhavn. Cap. VI. p. 61.
1851. Helmholtz, Beschreibung eines Augenspiegels. Berlin. S. 39.
1852. E. H. Weber, Über den Raumsinn und die Empfindungskreise in der Haut und im Auge. Verhandl. der Leipz. Gesellsch. 1852. S. 138.
A. Koelliker, Zur Anatomie und Physiologie der Retina. Verhandl. d. phys. med. Ges. zu Würzburg. 3. Juli 1852.
Donders, Onderzoekingen gedaan in het physiol. Labor. d. Utrechtsche Hoogeschool. VI. 134.
1853. D. Brewster, *Account of a case of vision without retina. Report of the British Assoc. at Belfast.* p. 3.
A. Fick und P. du Bois-Reymond, Über die unempfindliche Stelle der Netzhaut im menschlichen Auge. J. Müllers Archiv für Anat. und Physiol. 1853. p. 396.
Coccius, Die Anwendung des Augenspiegels. Leipzig. S. 20.
1855. H. Müller, Verhandl. d. phys.-med. Ges. zu Würzburg. IV. 100. V. 411—446.
1856. *Derselbe. Anatomisch-physiolog. Untersuchungen über die Retina bei Menschen und Tieren. Siebold und Köllikers Zeitschr. für wissensch. Zoologie. VIII. 1—122.
1857. Aubert und Förster, Über den blinden Fleck und die scharfsehende Stelle im Auge. Berliner allg. med. Zentralzeitung. 1857. No. 33. S. 259. 260.
1859. Coccius, Über Glaukom, Entzündung und die Autopsie mit dem Augenspiegel. Leipzig. S. 40 und 52.

Genauigkeit des Sehens.

1705. Hooke, *Posthumous works.* p. 12. 97.
1738. Smith, *Optics.* I. 31. (Übersetzung S. 29.)
Jurin, ibid. *Essay on distinct and indist. vision.* p. 149.
1752. Courtivron, *Hist. de l'Acad. de Paris.* p. 200.
1754. Tob. Mayer, Comment. Gotting. IV. 97 und 135.
1759. Porterfield, *On the eye.* II. 58.
1824. Amici in: *Ferussac bull. sc. math.* 1824. p. 221.
1829. Lehot, ibid. XII. 417.
1830. Holke, Disquis. de acie oculi dextri et sinistri. Lipsiae.

1831. Ehrenberg in Poggendorffs Ann. XXIV. 36.
1840. Hueck in J. Müllers Archiv für Anat. und Physiol. 1840. S. 82.
J. Müller, Handbuch der Physiologie. II. 82.
1841. Burow, Beiträge zur Physiologie und Physik des menschlichen Auges. Berlin. S. 38.
1846. Volkmann, Art.: Sehen in Wagners Handwörterbuch d. Physiol. III. 331. 335.
1849. Marié Davy, Institut. No. 790. p. 59.
1850. W. Petrie, Institut. No. 886. p. 415.
1852. E. H. Weber, Verhandl. der sächs. Ges. 1852. S. 145.
1854. Bergmann, Zur Kenntnis des gelben Flecks der Netzhaut. Henle und Pfeuffer, Zeitschr. (2) 245—252.
1855. Budge, Beobachtungen über die blinde Stelle der Netzhaut. Verhandl. des naturhist. Vereins d. Rheinlande. 1855. S. XLI.
1857. Bergmann in Henle und Peeuffer, Zeitschr. für rat. Med. (3) II. 88.
Aubert und Förster in Graefe, Archiv für Ophthalmologie III. Abt. 2. S. 1.
1860. G. Braun, Notiz zur Anatomie der Stäbchenschicht der Netzhaut. Wien. Ber. XLII. S. 15—19.
— G. M. Cavallieri, *Sul punto cieco dell' occhio. Atti dell' Istituto Lombardo.* II. 89—91.
1861. H. Müller, Bemerkungen über die Zapfen am gelben Fleck des Menschen. Würzburger Zeitschrift für Naturk. II. 218—221.
1862. H. Snellen, Letterproeven ter bepaling der gezigtsscherpte. Utrecht.
— J. Vroesom de Haan, Onderzoek naar den invloed van den leeftijd op de gezigtsscherpte. Utrecht.
— A. W. Volkmann, Physiologische Untersuchungen im Gebiete der Optik. Leipzig. Heft 1, S. 65.
1863. Wittich, Studien über den blinden Fleck. Archiv für Ophthalm. IX. 3. S. 1—38.
— K. Vierordt, Über die Messung der Sehschärfe. Ebenda. S. 219—223.
1864. Aubert, Physiologie der Netzhaut. Breslau. S. 187—251.
— W. Zehender, Historische Notiz zur Lehre vom blinden Fleck. Archiv für Ophthalm. X. 1. S. 152—155.
— O. Funke, Zur Lehre von den Empfindungskreisen der Netzhaut. Bericht der naturforsch. Ges. zu Freiburg i. Br. III. S. 89—116.
— Donders, *Anomalies of accommodation and refraction.* London. p. 188—203.

*Zusatz von W. Nagel.*

## § 18 A. Die Veränderung der Netzhaut unter der Einwirkung des Lichtes.

Wir kennen eine ganze Reihe von objektiven Veränderungen der Netzhaut, die in deutlicher Abhängigkeit von dem Einfluß des Lichts stehen.

### 1. Die Veränderungen des mikroskopischen Bildes der Netzhaut.

Vergleicht man im mikroskopischen Präparat das Aussehen von Netzhäuten, die vor der Konservierung und Färbung vor Lichteinwirkung geschützt waren, mit dem Bilde, das belichtete Präparate liefern, so findet man mannigfache Unterschiede. Die Färbbarkeit der Kerne in den verschiedenen Netzhautschichten, sowie die der Zapfenellipsoide ändert sich mit der Belichtung, und zwar nimmt bei Belichtung die Aufnahmefähigkeit für saure Farbstoffe ab.[1]

Auch an den Ganglienzellen der Netzhaut hat man Veränderungen gefunden, so insbesondere Birch-Hirschfeld[2] bei Behandlung der Präparate nach der Nisslschen Färbemethode. Bei intensiver Bestrahlung können diese Veränderungen sehr weitgehende sein, es können sich Vakuolen bilden usw. Es ist für

[1] Vgl. Birnbacher, v. Graefes Arch. f. Ophthalm. **40**, 1894. Zusammenstellung der übrigen Literatur bei S. Garten, Graefe-Sämischs Handbuch der gesamten Augenheilkunde I. Teil, III. Band, XII. Kapitel, Anhang.

[2] v. Graefes Arch. f. Ophthalm. **50**, 1900 u. Arch. f. Anat. u. Physiol. 1878.

diese Fälle nicht sicher, ob es sich um direkte Wirkungen des Lichtes auf die Ganglienzellen und Zapfenkörner handelt, oder ob der Angriffsort des Lichtreizes auch bei diesen übermäßigen Reizungen allein in den Zapfen zu suchen und die Veränderungen in den Nervenzellen durch die starke Beanspruchung bei der Fortleitung starker Reize zu erklären ist. Das Wahrscheinlichere ist wohl die direkte Lichtwirkung.

Angelucci[1] fand die chemische Reaktion der Netzhaut im Dunkeln alkalisch, während sie bei Belichtung sauer wurde. Neuere Untersuchungen haben diesen Befund bestätigt.

Besonderes Interesse haben bei vielen Forschern die Erscheinungen der phototropischen Pigmentwanderung und der Zapfenkontraktion unter dem Einfluß des Lichts erweckt, weil durch diese Vorgänge das ganze mikroskopische Bild der Netzhaut wesentlich verändert werden kann.

F. Boll[2] fand, daß die Netzhaut aus einem während mehrerer Stunden dunkel gehaltenen Froschauge sich leicht als durchsichtiges Häutchen entfernen läßt, während sie im belichteten Auge festhaftet und meistens nur in einzelnen Teilen herauszubekommen ist, die dann tiefschwarz aussehen. Im letzteren Falle ist das Pigmentepithel an der Stäbchen- und Zapfenschicht haften geblieben, im ersteren nicht. Czerny[3], Boll[2], Angelucci[4], Kühne[5] erkannten, daß das Pigment der Epithelzellen, aus feinen braunen Körnchen und Nadeln bestehend, zwischen die Stäbchen hineinwandern könne, und alsdann die einzelnen Stäbchen mit einer dichten Pigmenthülle umschließe. Es handelt sich dabei nicht etwa, wie man zunächst denken könnte, um amöboides Ausstrecken bzw. Wiedereinziehen von Protoplasmafortsätzen der Pigmentzellen, sondern diese erstrecken sich dauernd mit ihren Fortsätzen zwischen die Stäbchen hinein, auch wenn das Auge vor Licht geschützt war. Es wandert nur das Pigment im Dunkeln in die Zellkörper, in die Nähe des Kernes; bei Belichtung wandert es den Lichtstrahlen entgegen, in die Fortsätze zwischen den Stäbchen. Bei der Belichtung werden auch die Stäbchen etwas dicker, dadurch haften die Stäbchen und Pigmentfortsätze fest aneinander und infolgedessen wird beim Herausheben der Netzhaut aus dem eröffneten Bulbus die Pigmentschicht mitgerissen.

Die positiv phototropische Pigmentwanderung bei Belichtung vollzieht sich schneller als die Rückwanderung im Dunkeln. Im hellen Sonnenlicht wird die Lichtstellung in etwa 10 Minuten erreicht, während man volle Dunkelstellung gewöhnlich erst nach 1 bis 2 Stunden findet. Ein ausgeschnittenes Dunkelauge läßt, der Sonne eine Viertelstunde ausgesetzt, die positive Pigmentwanderung noch vollständig eintreten, während die Rückwanderung im ausgeschnittenen Auge nur unvollkommen erfolgt.

Außer bei Amphibien beobachtet man die Pigmentwanderung sehr deutlich bei Fischen und Vögeln, weniger deutlich bei Reptilien, und bei Säugetieren ist sie überhaupt nicht mit Sicherheit nachgewiesen worden. Dagegen beobachtet man auch bei diesen ein festeres Haften der Netzhaut an der Chorioidea, wenn das Auge belichtet war.

---

[1] *Encyclopédie française d'opht.* II. S. 108.
[2] Monatsberichte d. K. Akad. d. Wiss. Berlin 1877, Januar.
[3] Sitzungsber. d. K. Akad. d. Wiss. Wien LVI. 1867.
[4] Arch. f. Anat. u. Physiol. 1878.
[5] Untersuchungen aus dem Heidelberger physiol. Institut.

Von den Strahlen verschiedener Wellenlänge scheinen die kurzwelligen (blauen) stärker auf die Pigmentwanderung zu wirken, als die langwelligen (roten). Das Pigment nimmt seine Lichtstellung übrigens auch dann an, wenn nur der Rumpf des Tieres belichtet, das Auge dagegen verdunkelt wurde (Engelmann); auch allerlei andere Einflüsse wie Wärme, starke Abkühlung, mechanische Hautreize, erzeugen im Dunkeln Lichtstellung, vielleicht auf dem Wege des Reflexes. Daß aber auch direkte Wirkung des Lichtes in der Netzhaut möglich ist, geht, abgesehen von der Pigmentwanderung im herausgeschnittenen Auge, aus einem von Kühne beschriebenen Versuch hervor: Belichtet man ein Froschauge so, daß einzelne Teile der Netzhaut von hellerem Licht getroffen werden, andere möglichst wenig Licht bekommen, so haftet nachher nur an ersteren das Pigment, an den dunkel gehaltenen Stellen aber nicht.

Eine leicht nachweisbare Veränderung, die von van Genderen Stort[1] entdeckt wurde, vollzieht sich unter dem Einfluß des Lichts an den Zapfen der Netzhaut, nämlich eine Verkürzung des Innengliedes bei Belichtung. Sie ist sehr beträchtlich beim Frosch (hier verkürzt sich das Innenglied um mehr als 50 Prozent, noch stärker bei vielen Fischen; Garten sah beim Bley Verkürzung von 50 auf 5 $\mu$. Beim Aal scheint diese Reaktion zu fehlen. Bei Reptilien und Vögeln ist die Verkürzung weit geringer, bei Säugetieren ganz unbedeutend, doch für Affen durch Garten immerhin ziemlich sicher nachgewiesen. Für das menschliche Auge fehlen ganz entscheidende Beobachtungen noch.

Bei Amphibien und Fischen sind die durch Verkürzung des Innengliedes bewirkten Verschiebungen so beträchtlich, daß der Zapfen, dessen Außenglied im Dunkelauge in der äußersten Zone der Stäbchenschicht steht, bei Belichtung bis an die Membrana limitans externa hereingezogen wird. Ein nicht unerheblicher Teil aller Zapfen, z. B. beim Frosch, ist übrigens unbeweglich. Diese unbeweglichen Zapfen sitzen meist nahe der Grenzmembran.

Die Zapfenverkürzung geht schneller vor sich als die Pigmentwanderung, sie pflegt z. B. beim Frosch, dessen Augen hellem Tageslicht ausgesetzt werden, in 2 Minuten schon voll entwickelt zu sein. Auch ist die Empfindlichkeit der Reaktion weit größer; Kerzenlicht bedingt Lichtstellung der Zapfen, während das Pigment dabei nicht oder nur wenig vorwandert.

In noch höherem Grade als für die Pigmentwanderung gilt für die Zapfenverschiebung, daß außer dem direkten Lichtreiz allerlei Hautreize zur Zapfenretraktion führen können (Herzog[2]). Unkenntnis dieser Tatsache kann leicht dazu führen, Verschiebungen der einzelnen Netzhautteile irrtümlich auf Lichtwirkung zu beziehen.

Über die Frage, ob Lichtreizung des einen Auges auch in dem anderen, verdunkelt gehaltenen Auge durch Nervenleitung Lichtstellung der Zapfen bewirken kann, ist noch keine Einigkeit der Autoren erzielt. Engelmann[3] hatte positive, A. E. Fick[4] negative Ergebnisse erhalten. Der Versuch ist nicht leicht ganz einwandfrei zu gestalten.

Was nun die theoretische Deutung der als Erfolg der Lichtreizung auftretenden Bewegungen des Netzhautpigments und der Zapfen betrifft, so ist

[1] Onderzoek. Physiol. Labor. Utrecht (3), **9**, 145, 1883.
[2] Arch. f. (Anat. u.) Physiol. 1905, 413.
[3] Arch. f. d. ges. Physiol. **35** (1885).
[4] Vierteljahrsschr. naturforsch. Ges. Zürich **35**, 1890. **40**, 1894. v. Graefes Arch. f. Ophthalm. **37**, 1891.

hier große Vorsicht angezeigt. Im Auge zu behalten ist vor allem, daß keiner der beiden Vorgänge in der menschlichen Netzhaut ganz sicher nachgewiesen ist, und daß auch bei Säugetieren, bei welchen Versuche leichter anzustellen sind, jene Erscheinungen sehr viel schwächer als bei Fischen und Amphibien, meist überhaupt nur spurenweise, auftreten. Ja, wir haben nicht einmal einen strengen Beweis dafür, daß die Verschiebungen in der Anordnung der einzelnen Netzhautteile, wie wir sie in mikroskopischen Präparaten von belichteten und von dunkel gehaltenen Augen finden, während des Lebens tatsächlich in gleicher Weise vor sich gehen. Bei sehr vielen anderen kontraktilen Gewebsteilen wie auch bei den kontraktilen Einzelzellen, wie den Amöben, gelingt es nicht, oder nur höchst unsicher, die Fixierung willkürlich im Zustande der Kontraktion oder in dem der Expansion zu erreichen. Bei der chemischen Fixierung wie auch bei der Isolierung der Elemente in Zupfpräparaten sind heftige Reizungen der Gewebsteile nicht zu vermeiden, und es muß die Möglichkeit berücksichtigt werden, daß Belichtung und Verdunkelung nur die Empfänglichkeit der Pigmentzellen bzw. der Zapfen für die Reizung bei der Präparation quantitativ oder qualitativ beeinflusse.

Macht man die immerhin plausible Annahme, jene Verschiebungen spielten sich auch in der normalen Netzhaut in situ ähnlich ab, wie sie sich im mikroskopischen Präparat darstellen, so liegt es am nächsten, sie mit der Änderung der Erregbarkeit des Sehapparats bei dem Wechsel zwischen Helladaptation und Dunkeladaptation in Beziehung zu setzen. Derartige Deutungen sind denn auch verschiedentlich versucht worden. Es wurde erwogen, ob die Pigmentbewegung mit der Bildung des Sehpurpurs zusammenhänge. Andererseits hat man die Trennung der einzelnen Stäbchen durch dazwischen geschobene Pigmentschichten als einen Schutz für schädliche Diffusion des Lichtes in der Sehepithelschicht angesehen. Ein näheres Eingehen auf diese Fragen wird zweckmäßigerer Weise erst weiter unten bei Erörterung der neueren Theorien über die Funktion der Stäbchen und Zapfen erfolgen.

### 2. Die Bleichung des Sehpurpurs.

Die purpurne oder rosarote Färbung der Stäbchenaußenglieder, welche unter Umständen die ganze isolierte Netzhaut gefärbt erscheinen läßt, ist unter der Einwirkung des Lichtes vergänglich. Der rote Farbstoff war schon H. Müller, Leydig und Max Schultze aufgefallen. Fr. Boll[1] entdeckte seine interessanteste Eigenschaft, die hochgradige Lichtempfindlichkeit. Genauere Untersuchungen über den „Sehpurpur“ oder das „Sehrot“ verdanken wir Kühne[2], König[3], Abelsdorff[4], Trendelenburg[5], Garten[6] u. a. Forschern.

[1] Berlin. Monatsber. 12. Nov. 1876; *Acad. dei Lincei*, 3. Dez. 1876; Arch. f. Anat. u. Physiol. 1877.

[2] Untersuchungen d. physiol. Instituts Heidelberg. II. III. IV; ferner Zusammenfassung in Hermanns Handbuch der Physiologie. II. 1879.

[3] A. König, Gesammelte Abhandlungen. XXIV. Über den menschlichen Sehpurpur und seine Bedeutung für das Sehen (Auch in: Sitzungsber. Akad. Wiss. Berlin XXX. 1894).

[4] Sitzungsber. Akad. Wiss. Berlin. XXXVIII. 1895; Zeitschr. f. Psychol. und Physiol. d. Sinnesorgane **12**, 1896.

[5] Zeitschr. f. Physiol. u. Psychol. d. Sinnesorg. **37**, 1904.

[6] Gräfe-Sämischs Handbuch der Augenheilkunde, 1. Teil, III. Band, XII. Kapitel.

Man hat den Purpur in den Stäbchen aller untersuchten Wirbeltiere gefunden, auch in denen des Menschen. Wo die Stäbchen fehlen, findet sich auch kein Purpur, so in der Netzhaut mancher Vögel und Reptilien, und ebenso in der stäbchenfreien Zentralgrube der menschlichen Retina. Bei manchen Tieren enthalten nur beschränkte Teile der Netzhaut reichlich Purpur; beim Kaninchen findet man einen horizontalen Streifen besonders stark gefärbt, die sog. Purpurleiste. In den Stäbchen des äußeren Netzhautrandes, nahe der Ora serrata, hat man keinen Purpur gefunden.

Beim Frosch sind vereinzelt auch grüne Stäbchen gesehen worden.

Um die Purpurfarbe zu sehen, entnimmt man die Netzhäute den Augen eines Tieres, das vor der Tötung zwei oder mehr Stunden im Dunkeln gehalten wurde. Die Präparation der Netzhaut erfolgt wegen der Empfindlichkeit des Farbstoffs für grüne und blaue Strahlen am besten bei rotem Licht oder bei dem Licht einer Natriumflamme. Beim Frosch gelingt es leicht, die ganze Netzhaut mit der Pinzette herauszuheben, wenn man sie an der Stelle des Sehnerveneintritts mit spitziger Pinzette faßt. Bei Eulen, die besonders purpurreiche Netzhäute besitzen, kann man aus dem eröffneten Auge unter Wasser (oder Kochsalzlösung) die Netzhaut herausheben, nachdem man die Anheftung am Sehnerven durch eine kleine ringförmige Stanze durchstochen hat. Ebenso verfährt man bei Säugetieraugen, doch ist es hier nützlich, das im Äquator halbierte Auge vorher eine Stunde in 4 prozentiger Alaunlösung liegen zu lassen, welche die Netzhaut durch Gerbung widerstandsfähiger gegen das Zerreißen macht. Man legt dann die isolierte Netzhaut auf eine Milchglasplatte oder besser auf ein kugeliges Schälchen von Porzellan von der Krümmung des Augapfels, die Stäbchenseite nach außen.

Erzeugt man in dem Auge eines soeben getöteten oder durch Curare gelähmten Tieres ein kontrastreiches Bild, indem man es etwa gegen ein Fenster mit Fensterkreuz richtet, so erhält man, wie Kühne zeigte, unter Umständen scharf umgrenzte Bleichungswirkungen, sog. Optogramme, die das verkleinerte Bild des abgebildeten Objektes darstellen. Die vom Licht getroffenen Partien sind hell, die beschattet gebliebenen noch deutlich rot.

Bei Froschaugen sind gute Optogramme deshalb nicht so leicht zu erhalten, weil an den belichtet gewesenen Stellen die Netzhaut zu fest am Pigmentepithel haftet, um sie als Ganzes herausbekommen und auf ein Porzellanknöpfchen ausbreiten zu können. Leichter löst sich die Netzhaut, wenn man die Frösche zuerst curarisiert und dann durch mehrstündiges Liegen im Wasser ödematös macht. Nach Angaben von S. Garten ist auch Chininvergiftung in gleichem Sinne wirksam.

Mit dem Augenspiegel kann man den Sehpurpur weder beim Menschen noch bei Säugetieren im lebenden Auge erkennen, da die durchsichtige Netzhaut entweder auf einer sehr dunkelpigmentierten oder in lebhafter Eigenfarbe glänzenden Unterlage (Tapetum der Raubtiere) gesehen wird. Es gibt indessen einige Tiere, die ein rein weißes oder fast weißes Tapetum besitzen, und bei diesen gelang es Abelsdorff[1] den ophthalmoskopischen Nachweis sowohl des ungebleichten Sehpurpurs wie auch seine Ausbleichung im hellen Lichte zu beobachten. Von Fischen eignet sich dazu der Bley (Abramis Brama), von Reptilien das Krokodil (Alligator lucius).

[1] Sitzungsber. Akad. Wiss. Berlin. XVIII. 1895; Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **14**, 1897; Arch. f. (Anat. u.) Physiol. 1898.

In Wasser ist der Sehpurpur nicht löslich; Alkohol, Äther und Chloroform sowie die meisten Säuren und Alkalien vernichten seine Farbe schnell. Dagegen ist der Purpur leicht löslich in den Salzen der Gallensäuren, welche die Substanz der Stäbchen fast momentan auflösen.

Wenn man purpurhaltige Netzhäute im Dunkeln in 2- bis 5 prozentige Lösung von glykocholsaurem Natron legt, die Flüssigkeit filtriert und zentrifugiert, so erhält man klare Lösungen, an denen die Purpurfarbe besonders deutlich zu sehen ist, wenn die Flüssigkeit im Vakuum über Schwefelsäure bis auf wenige Tropfen eingedampft ist. Auch diese Lösung ist lichtempfindlich. Im Dunkeln bewahrt sie ihre Farbe, im Licht bleicht sie, und zwar in diffusem Tageslicht in wenigen Minuten, langsamer bei künstlichem Licht.

Der Purpur sowohl in der frischen Netzhaut wie in Lösung ist nicht bei allen Tieren gleich gefärbt. Während beim Frosch und der Katze der Purpur dem eigentlichen Rot sich annähert, zeigt er bei den Eulen und Fischen eine mehr dem Violett angenäherte Purpurfarbe. Auch beim Menschen ist er nach Kühne violetter als beim Frosch.

Bei der Ausbleichung können verschiedene Farbenskalen durchlaufen werden. Unter Umständen nämlich bleicht der Purpur so aus, daß die Farbe immer weißlicher wird und die Netzhaut schließlich fast farblos aussieht. In anderen Fällen geht die Farbe aus Purpur in Rot, Orange, Gelb und erst nach langem Bleichen in Weiß über. Garten hat gezeigt, daß der zweite Fall, Auftreten einer deutlichen Gelbfärbung, bei schneller Bleichung in grellem Licht (Sonnenlicht) eintritt, das einfache Verblassen dagegen bei recht langsamer Bleichung.

Behandlung des Sehpurpurs mit manchen Metallsalzen wie Chlorzink, Platinchlorid, sowie mit Essigsäure verwandelt ihn in einen sehr lichtbeständigen gelben Farbstoff. Formol läßt in der Netzhaut unter Umständen deutliche Rotfärbung bestehen bleiben.

Von besonderem Interesse sind die quantitativen Feststellungen über die Absorption der einfachen Lichter durch den Sehpurpur, wie sie von Kühne, ferner von König und seinen Schülern, sowie neuerdings von Trendelenburg und Garten ausgeführt worden sind. Für die Messungen dienten klare Lösungen, die während der Absorptionsbestimmungen möglichst vor Ausbleichung geschützt wurden. Stellt man die Absorptionswerte in Kurvenform dar, indem man auf der Abszissenachse die Wellenlängen eines Spektrums, als Ordinaten die Größe der Absorption der einzelnen Lichtarten aufträgt, so findet man ein ausgesprochenes Absorptionsmaximum im Grün.

Für den mehr violettpurpurnen Farbstoff der Fischnetzhaut liegt nach den vergleichenden Messungen von Koettgen und Abelsdorff[1] das Absorptionsmaximum etwas weiter nach dem Gelbgrün hin.

Vergleicht man die Absorption ungebleichter Lösungen mit derjenigen von Lösungen, die mehr oder weniger ausgebleicht sind, so zeigt sich vor allem eine Verminderung der Absorption im Grün als regelmäßiger Erfolg der Lichteinwirkung. Unter den Bedingungen, die zur Verfärbung der Netzhaut nach Gelbrot hin führen, ist nach den Beobachtungen von Garten[2] gleichzeitig mit der Verminderung der Absorption im Grün eine Verstärkung der Absorption

[1] Sitzber. Akad. Wiss. Berlin. XXXVIII. 1895.
[2] v. Graefes Arch. f. Ophthalm. 63, 1906.

im Violett nachweisbar, woraus auf die Entstehung eines gelbgefärbten Zersetzungsproduktes unter dem Einfluß der Purpurbleichung zu schließen ist (Kühnes „Sehgelb"). Es ist nicht unwahrscheinlich, daß sich ein solcher gelber Stoff auch in der lebenden Netzhaut in geringen Mengen bilden kann, doch ist dies nach den Erfahrungen an Tiernetzhäuten und Purpurlösungen nur für den immerhin ungewöhnlichen Fall anzunehmen, daß die in längerem Dunkelaufenthalt purpurreich gewordene Netzhaut plötzlich sehr intensivem Licht ausgesetzt würde.

Ausgehend von der Voraussetzung, daß bei der typischen totalen Farbenblindheit die Sehpurpurbildung und Bleichung in normaler Weise vor sich gehe, habe ich an einem total farbenblinden jungen Mädchen Versuche angestellt, die für die Bildung eines Sehgelb intra vitam möglicherweise den Beweis liefern konnten. Ich ließ das Mädchen am Helmholtzschen Spektrophotometer Gleichungen zwischen Grün und Violett einstellen, was natürlich leicht gelingt. Wenn nun ihre Netzhaut unter gewissen Umständen einen gelblicheren Farbstoff enthielt als unter anderen Umständen, so konnte sich das eventuell darin äußern, daß jene unter den einen Umständen gültige Gleichung Grün-Violett unter den anderen Umständen ungültig wurde. Ich konnte indessen nichts Regelmäßiges in dieser Hinsicht finden, obgleich ich Vergleiche anstellte: 1. zwischen einem durch einstündiges Verbinden dunkel gehaltenen und einem inzwischen der Tageshelligkeit ausgesetzten Auge (natürlich unter Berücksichtigung der sehr viel größeren Empfindlichkeit des Dunkelauges, für das beide Hälften der Gleichung proportional verdunkelt wurden); 2. verglich ich ein Auge, das bei Tageshelligkeit sich in dem Zustand mittlerer Helladaptation befand, mit dem anderen, das längere Zeit verschlossen gehalten und dann schnell unter der Einwirkung hellen Auerlichts helladaptiert wurde. Ich wollte hierdurch die langsame und die schnelle Ausbleichung des Purpurs in Vergleich bringen. Hinderlich für die Durchführung dieses Versuchs ist der Umstand, daß ein wirklich intensiv mit Licht bestrahltes Auge eines Totalfarbenblinden zunächst überhaupt nichts mehr sieht (z. B. nach Erleuchtung mit dem Augenspiegel bei erweiterter Pupille), daß man also nur ziemlich mäßige Grade der Helladaptation anwenden kann.

Je stärker die Absorption einer Lichtart im Sehpurpur ist, desto stärker ist ihre Bleichungswirkung auf den Purpur. Schon Kühne fand, daß gelbgrünes Licht am schnellsten bleicht, gelb und rot sehr langsam. Neuerdings hat W. Trendelenburg sorgfältige Versuche mit spektralen Lichtern gemacht; er ließ von zwei Sehpurpurproben immer eine von dem Licht der Natriumlinie ($\lambda = 589\ \mu\mu$) und eine zweite von einem anderen Licht desselben Dispersionsspektrums bestrahlen und verglich nach bestimmten Zeiten die Absorptionsverminderung im Spektrophotometer. Die folgende Tabelle gibt nach Trendelenburgs Untersuchungen die „Bleichungswerte" für Kaninchensehpurpur. Der Wert für Natriumlicht ist = 1 gesetzt.

| Wellenlänge | 589 | 542 | 530 | 519 | 509 | 491 | 474 | 459 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bleichungswerte | 1 | 3,40 | 3,62 | 3,45 | 3,09 | 1,69 | 0,975 | 0,299 |

Regeneration des Sehpurpurs nach der Ausbleichung erfolgt sowohl im lebenden wie unter Umständen auch im ausgeschnittenen Auge, ja in gewissem Maße sogar in isolierten Netzhäuten und Lösungen. Wenn bei einem lebenden Frosch beide Augen dem Sonnenlicht während einer halben Stunde ausgesetzt worden sind und nun dem getöteten Tiere die Augäpfel entnommen werden, so findet man die Netzhaut des sofort geöffneten Auges farblos, die des anderen Auges, das man eine Stunde im Dunkeln in feuchter Kammer hat

liegen lassen, purpurrot. Die erste Spur von Rotfärbung nach völliger Ausbleichung fand Kühne beim Frosch nach 20 Minuten dauerndem Lichtabschluß, beim Kaninchen nach etwa 5 Minuten. Weitaus am besten und vollständigsten vollzieht sich die Regeneration dann, wenn die Netzhaut dem Pigmentepithel anliegt, während eine pigmentfreie, dem Auge entnommene Retina nicht wieder die volle Röte erhält.

Als günstigste Bedingung für die Regeneration von Purpur in der isolierten Netzhaut fanden Kühne und Garten die schnelle Ausbleichung zur gelben Farbe und darauffolgende Verdunkelung. Der Purpur scheint sich also aus seinen noch gefärbten Zersetzungsprodukten am leichtesten wieder zu regenerieren. Wenn die Netzhaut völlig ausgebleicht war, so geht die Regeneration nicht durch die Zwischenstufen Gelb, Orange und Rot hindurch, sondern durch hell-lila und rosa. Hier muß also der Prozeß der Purpurbildung ein anderer sein, als wenn aus den gelblichen Bleichungsprodukten der Purpur restituiert wird.

Sowohl die Lichtbleiche wie die Regeneration sind von der Temperatur abhängig. Besonders die Regeneration wird durch Kälte sehr bedeutend verzögert, so daß ein Froschauge bei 0° erst in 9 Stunden seinen Purpur wieder ergänzt. Beim Warmblüter erlischt die Regeneration schon wenige Minuten nach dem Tode oder nach dem Abschluß des Auges von der Zirkulation. Offenbar betrifft die Schädigung dabei in erster Linie das für die Regeneration wichtige Pigmentepithel. Alles, was wir über die Physiologie des Purpurs in Lösungen und isolierten Netzhäuten wissen, wird auf das vom Blut durchströmte Warmblüterauge nur mit Vorsicht anzuwenden sein.

Bemerkenswert ist noch die Eigenschaft der Netzhaut, zu fluoreszieren,[1] wenn sie vom ultravioletten Licht getroffen wird. Diese Fluoreszenz ist merklich stärker, wenn die Netzhaut im Licht gebleicht ist, als wenn sie purpurreich ist. Dies gilt, wie Himstedt und Nagel fanden,[2] auch für die Netzhaut der Taube, die, wenn überhaupt, jedenfalls nur sehr wenig Purpur enthält. Lösung des Purpurs in Galle fluoresziert ebenfalls, doch ist zu bedenken, daß auch die Lösung der Gallensalze an und für sich schon fluoresziert, und zwar kaum merklich schwächer, als wenn sie ungebleichten Froschpurpur enthalten. Setzt man aber Tropfen einer Lösung von glykocholsaurem Natron und ebensolche mit darin gelöstem Sehpurpur, in Platinösen aufgehängt, dem Tageslicht aus, so fluoreszieren die vorher purpurhaltigen Tropfen im Dunkeln nachher deutlich stärker als die anderen. Die Bleichungsprodukte des Sehpurpurs fluoreszieren also sicher, während es für den Purpur selbst nicht außer Zweifel steht.

### 3. Elektromotorische Erscheinungen am Auge.

Sowohl das ganze lebende Auge, wie die isolierte überlebende Netzhaut aller darauf untersuchten Wirbeltiere zeigt, wie E. du Bois-Reymond fand, eine Potentialdifferenz zwischen vorderem und hinterem Augenpol, und wenn man zwei Punkte eines solchen Präparates mittels unpolarisierbarer Elektroden mit einem empfindlichen Galvanometer verbindet, so läßt sich ein Strom dauernd ableiten, solange das Präparat nicht abgestorben ist. Am meisten hat man Froschaugen untersucht, die noch stundenlang nach dem Ausschneiden aus dem Körper des

[1] Helmholtz, Pogg. Ann. 94 (1855); Setschenow, v. Graefes Arch. f. Ophthalm. 5, 1859.
[2] Festschr. d. Albert-Ludwigs Universität Freiburg f. Großherzog Friedrich. 1902.

getöteten Tieres diesen sogenannten „Ruhestrom“ erkennen lassen. Der Sehnervenstumpf ist negativ gegenüber dem vorderen Teil des Auges. Dagegen ist der Sehnerv positiv gegen die hinteren seitlichen Teile des Bulbus.

Wird von der Innen- und Außenseite einer isolierten Netzhaut abgeleitet, die Netzhaut also zwischen die Elektroden genommen, so ergibt sich aus Kühnes[1] und Steiners Untersuchungen,[2] daß die Stäbchenseite negativ elektrisch ist gegenüber der Nervenfaserseite der Netzhaut.

Während das freipräparierte Froschauge stundenlang Strom gibt, erlischt die elektromotorische Kraft bei Fischaugen, sowie bei den Augen von Warmblütern meist schon nach wenigen Minuten, wenn die Durchblutung aufgehört hat.

Die elektromotorische Kraft schwankt bei verschiedenen Individuen derselben Art beträchtlich, so bei den von Himstedt und Nagel[3] untersuchten Froschaugen zwischen 0,0056 und 0,017 Volt. Die durchschnittlich von anderen Forschern gefundenen Werte liegen zwischen 7 und 9 Millivolt.

Aber auch bei dem einzelnen Präparat bleibt die Stromstärke weder konstant, noch läßt sich ein gleichmäßiges Absinken als Regel angeben; ohne erkennbaren Grund nimmt die Stromstärke zu und wieder ab. Bei Fröschen erfolgt dieser Wechsel langsam, im Laufe von Minuten, während bei Vögeln, besonders Tauben, oft ein schnelles, scheinbar ganz regelloses Wechseln der Stromstärke zu bemerken ist; das die Galvanometernadel kaum auf Sekunden zur Ruhe kommen läßt. Bei länger dauernden Versuchen kann sich die Stromrichtung umkehren, auch beim Frosch.

Bisher war angenommen worden, daß der Strom von einem dauernd im Dunkeln gehaltenen Auge abgeleitet werde („Dunkelstrom“). Fällt in ein solches Auge plötzlich Licht, so zeigt der Strom Schwankungen seiner Intensität, die je nach der Beschaffenheit des Präparates verschieden ausfallen. Sie wurden zuerst von Holmgren,[4] dann unabhängig von ihm durch Dewar und Mc Kendrick[5] entdeckt. Am leichtesten nachweisbar sind die folgenden Erscheinungen am Froschauge, das enukleiert wird, und an welchem die eine unpolarisierbare Fadenelektrode am Hornhautrande, die andere am Sehnervenstumpf angelegt wird; nach einer Latenzzeit von $^1/_{10}$ bis $^1/_5$ Sekunde steigt der Strom ziemlich schnell an und zwar um etwa 3 bis 10 Prozent des Dunkelstroms. Wirkt der Lichtreiz noch länger ein, so steigt bei Augen, die vorher durch Lichtabschluß recht empfindlich gemacht worden sind, der Strom noch langsam weiter an. Bei Beleuchtung mit einer hellen Glühlampe sieht man den Strom bis zu einer Minute zunehmen, dann sinkt er trotz fortdauernder Bestrahlung. Bei schwächerem Lichtreiz dauert das Ansteigen noch länger. Bei Augen, die von Hellfröschen stammen, die also vor dem Versuch längerer Lichteinwirkung ausgesetzt waren, sinkt die Stärke des Stroms nach schneller Erreichung eines Maximums fast ebenso schnell wieder ab, doch in der Regel nicht ganz bis zur Stärke des Dunkelstromes.

Wird das Reizlicht plötzlich gelöscht, so tritt, nach ähnlicher Latenz wie bei der Belichtungsreaktion, die Verdunkelungsreaktion ein, bestehend in einer

[1] Untersuchungen über tierische Elektrizität. **2.** Abteil. 1. Berlin 1849.
[2] Untersuch. d. physiol. Instit. Heidelberg. **3** und **4**.
[3] Ber. naturf. Gesellsch. Freiburg i. Br. 1901; Ann. d. Physik. (4) **4**, 1901.
[4] *Upsala Läkares Förhandlingar.* 1866 und 1871.
[5] *Phil. Transact. Roy. Soc. Edinburgh.* **7**. 1871—72.

erneuten schnellen Zunahme des Stromes, der dann ziemlich langsam zur Stärke des Dunkelstromes zurückkehrt.

Bei anderen Tieren verläuft die Reaktion vielfach anders als beim Frosch. Bei Reptilien und bei Tagvögeln (Tagraubvögel, Huhn) tritt entweder nach der Belichtung (nach einer Latenz von $^1/_{40}$ bis $^1/_{15}$ Sek.) alsbald eine starke negative Schwankung des Stromes auf, oder es tritt zuerst ein kurzer positiver „Vorschlag" ein, dem dann noch während der Belichtungsdauer die negative Schwankung folgt. Bei der Verdunkelung geht entweder der Strom ohne weiteres auf seine Ruhestärke zurück, oder es zeigt sich vorher eine abermalige negative Schwankung. Diese Verhältnisse sind besonders durch Untersuchungen von H. Piper[1] klargestellt worden. Bei Nachtraubvögeln bestätigte derselbe Forscher die Beobachtung von Himstedt und Nagel, daß hier als Effekt der Belichtung nur eine starke positive Schwankung erfolgt, der nach Verdunkelung eine ebenso starke negative sich anschließt. Auch bei Säugetieren besteht die Reaktion in der Hauptsache aus einer positiven Schwankung.

Jede Beschädigung des Augapfels verändert sein elektromotorisches Verhalten, indem sie das Auftreten negativer Schwankungen begünstigt. So antwortet die dem Auge entnommene Netzhaut des Frosches auf den Lichtreiz zuerst mit negativer Schwankung, an die sich dann eine positive anschließt. Die positive Verdunkelungsschwankung fehlt auch solchen geschädigten Präparaten nicht. An ganz frischen Präparaten verschiedener Tieraugen fand Garten noch eine der positiven Stromschwankung vorausgehende ganz flüchtige negative Schwankung als regelmäßigen Reizungserfolg.

Die Empfindlichkeit der beschriebenen photoelektrischen Reaktionen ist zum Teil sehr beträchtlich, besonders bei denjenigen Tierarten, die in ihrer Netzhaut zahlreiche Stäbchen und gut entwickelte Sehpurpurproduktion aufweisen. Für das Froschauge z. B. dürfte der Schwellenwert der zur Erregung der Stromschwankung eben ausreichenden Energie sehr nahe derselbe sein, der auch im (dunkeladaptierten) Menschenauge eben eine Lichtempfindung auslösen kann. Die Augen des Frosches und verschiedener Eulenarten zeigen schon deutliche photoelektrische Reaktion bei Bestrahlung mit Röntgenstrahlen, während bei dem Huhn diese Wirkung vermißt wird. Das Licht einer glimmenden Zigarre, die Strahlen des Mondes, das Phosphoreszenzlicht eines mit Leuchtfarbe bestrichenen Papieres erzeugen schon deutliche photoelektrische Schwankungen, ebenso die Bestrahlung mit rein ultraviolettem Licht, das offenbar durch Erzeugung von Fluoreszenz in den brechenden Teilen des Auges wirkt.

Eine sorgfältige Prüfung der quantitativen Abhängigkeit der Netzhautströme von der Intensität des Reizlichtes durch de Haas[2] zeigte, daß die Reaktion dem Weber-Fechnerschen Gesetz nur innerhalb eines gewissen Bereiches ziemlich starker Reize annähernd folgt, während bei Einbeziehung auch schwächerer Reize die Abhängigkeit eine kompliziertere ist. Auffallend ist die überraschend lange Dauer der Stromschwankung, die nach kurz dauerndem Reiz („Momentanreiz") von genügender Intensität beobachtet wird. Die Reaktion kann das Hundertfache der Reizzeit betragen.

Man hat auch die Wirkung von Strahlen verschiedener Wellenlänge quantitativ verglichen und im Dispersionsspektrum die Verteilung der Reizwerte

[1] Arch. f. (Anat. u.) Physiol. 1905. Supplement.

[2] *Lichtprikkels en retinastroomen in hun quantitatief verband.* Inaug.-Diss. Leiden 1903.

für das Tierauge ermittelt, indem ein und dasselbe Auge nacheinander den verschiedenen Lichtern eines Spektrums für bestimmte Zeit ausgesetzt und die Größe des dabei entstehenden Galvanometerausschlags gemessen wurde. Wenn die Dauer der einzelnen Belichtungen nicht zu kurz gewählt werden und für Einschaltung genügend langer Pausen zwischen den Belichtungen Sorge getragen wird, gibt die Größe des bei jeder Belichtung eintretenden Gesamtausschlags ein Maß für die spezifische Reizwirkung der gewählten Lichtart. Auf diese Weise haben Himstedt und Nagel[1] am Frosch, Piper[2] an verschiedenen Warmblütern die relativen Reizwerte bestimmt. Es zeigte sich, daß das Verhalten der photoelektrischen Reaktion bei verschiedenen Tieren merklich verschieden ist, und auch ein und dasselbe Tier im Zustande der Helladaptation und der Dunkeladaptation verschiedene Reizwerte ergeben kann. Für das dunkeladaptierte Froschauge liegt die maximale Reizwirkung im Gelbgrün bei $\lambda = 544\,\mu\mu$, für den helladaptierten Frosch dagegen im Goldgelb bei $590\,\mu\mu$. Von den untersuchten Vögeln zeigen die Nachtvögel (verschiedene Eulenarten) das Maximum um $535—540\,\mu\mu$, die Tagvögel (Mäusebussard, Huhn, Taube) um $600\,\mu\mu$. Hunde, Katzen und Kaninchen zeigten das Maximum ebenfalls um $535\,\mu\mu$, und zwar erstere Tiere auch dann, wenn das Auge vorher durch helle Bestrahlung in den Zustand der Helladaptation gebracht wurde. Bei einem helladaptierten Kaninchen sah Piper dagegen die Verteilung der Reizwerte ähnlich, wie Himstedt und Nagel sie beim helladaptierten Frosch gefunden hatten, nämlich mit dem Maximum im Gelb ($574\,\mu\mu$).

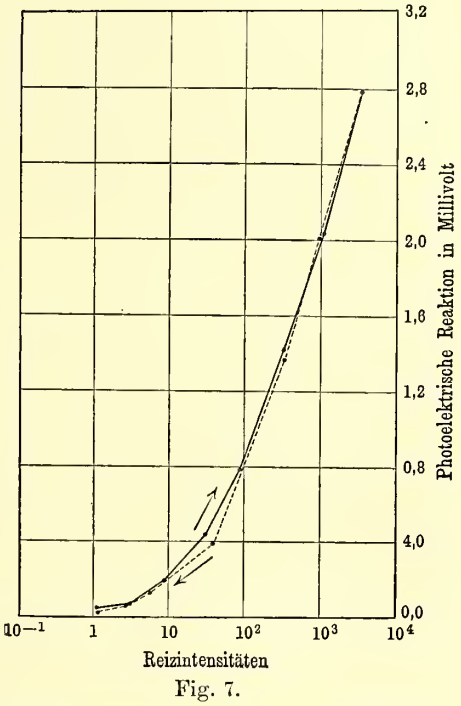



Fig. 7.

Abhängigkeit der photoelektrischen Reaktion von der Reizstärke (nach de Haas).

Auf die Beziehungen dieser besonderen Tatsachen zu den subjektiven Erscheinungen des Farbensehens wird erst weiter unten einzugehen sein.

Was die Deutung der photoelektrischen Reaktion überhaupt betrifft, so stößt sie unzweifelhaft auf große Schwierigkeiten. Die zeitlichen Verhältnisse des objektiv nachweisbaren elektrischen Vorganges in der Netzhaut sind von denjenigen der subjektiven Gesichtsempfindung allzu verschieden, als daß man eine ganz enge Beziehung zwischen den beiden Erscheinungen statuieren möchte.

Die Zeit des „Anklingens“ der Gesichtsempfindung, wie sie Exner[3] bestimmt hat, und die Latenz der elektromotorischen Reaktion beim Warmblüterauge in den Versuchen von Piper, Garten u. a. fallen allerdings nicht

[1] Ber. d. Naturf. Ges. Freiburg i. Br. **11** (1901).
[2] Arch. f. (Anat. u.) Physiol. 1905. Supplement.
[3] Wiener Sitz.-Ber. **58**, 601.

allzu weit auseinander; es handelt sich in beiden Fällen um wenige hundertstel Sekunden. Der übrige Verlauf der elektrischen Schwankungen weist aber Eigenschaften auf, die mit dem subjektiven Verhalten der Gesichtsempfindung, besonders bei ganz kurzen Reizen, einstweilen schwer in Einklang zu bringen sind. Bemerkenswert ist immerhin, daß der zeitliche Verlauf der photoelektrischen Reaktion dem der Gesichtsempfindung um so mehr vergleichbar wird, je mehr bei den Messungen die Netzhaut des untersuchten Auges unter normalen Bedingungen gehalten werden konnte. Bei Eulen besonders lassen sich diese Versuche ja so bequem ausführen ohne nennenswerte Störung der Funktion des Auges, und gerade bei ihnen findet man den Stromablauf am einfachsten: positive Schwankung während der Belichtung, Umschlag in negative Schwankung sehr bald nach der Verdunkelung. Dabei liegt es natürlich nahe, an das negative Nachbild zu denken. Indessen sind solche Vergleiche bei dem jetzigen Stand der Kenntnisse noch ziemlich unfruchtbar, und es wird ihre Erweiterung durch fortgesetzte Untersuchungen an Warmblüteraugen abzuwarten sein. N.

## § 19. Die einfachen Farben.

Wir gehen jetzt über zur Untersuchung der Empfindungen, welche verschiedenartiges Licht im Sehnervenapparat erregt. Es gibt, wie wir schon im § 8 auseinandergesetzt haben, Licht von verschiedener Schwingungsdauer, welches sich außerdem in physikalischer Beziehung durch seine Wellenlänge, seine Brechbarkeit und Absorptionsfähigkeit in gefärbten Mitteln unterscheidet. In physiologischer Beziehung unterscheidet sich Licht von verschiedener Schwingungsdauer im allgemeinen dadurch, daß es im Auge die Empfindung verschiedener Farben erregt.

Alle Lichtquellen, welche wir kennen, entsenden gleichzeitig Licht von verschiedener Schwingungsdauer. Um aus solchem gemischten Lichte einfaches Licht, d. h. Licht von einem einzigen Werte der Schwingungsdauer auszusondern, ist die Brechung in durchsichtigen Prismen das vollkommenste Mittel. Wenn von einer entfernten Lichtquelle *a* (Fig. 8) einfaches blaues Licht durch ein Prisma *P* in das Auge des Beobachters *O* fällt, so werden die Lichtstrahlen im Prisma gebrochen, von ihrem früheren Wege abgelenkt, und der Beobachter erblickt daher das Bild der Lichtquelle verschoben in der Richtung, nach welcher der brechende Winkel *p* des Prismas gekehrt ist, etwa bei *b*, natürlich in der Farbe des Lichts, welches von *a* ausgegangen ist, hier also blau. Fällt einfaches Licht anderer Brechbarkeit, etwa rotes, von *a* durch das Prisma in das Auge des Beobachters, so sieht er wieder ein Bild der Lichtquelle, jetzt rot, und weniger weit verschoben, als das blaue war, etwa bei *r*. Geht gleichzeitig rotes und blaues Licht von *a* aus, so sieht der Beobachter auch gleichzeitig das rote Bild bei *r* und das blaue Bild bei *b*. Und geht endlich weißes Licht von *a* aus, welches sowohl rotes, als blaues, als auch Licht von allen anderen Stufen der Brechbarkeit enthält, so entspricht jeder einzelnen

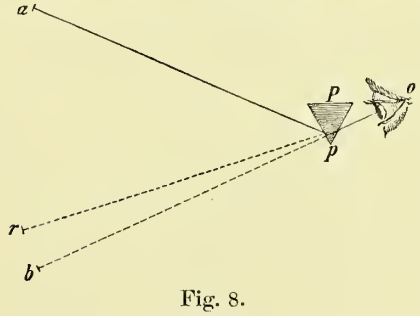


Fig. 8.

Farbe ein besonderes Bild der Lichtquelle, und zwar so, daß die Bilder der zwischen rot und blau liegenden Farben sich nach der Ordnung ihrer Brechbarkeit zwischen *r* und *b* einreihen. Sind sehr viele solche farbige Bilder zwischen *r* und *b* eingeschoben, und hat jedes eine gewisse Breite, die der Breite des leuchtenden Objekts bei *a* nahehin gleich ist, so wird jedes einzelne farbige Bild einen Teil seiner Nachbarbilder verdecken. Auch ist leicht einzusehen, daß es desto weniger die Nachbarbilder decken und sich mit ihnen vermischen wird, je schmaler das leuchtende Objekt ist, und je schmaler daher auch jedes einzelne farbige Bild wird, verglichen mit der ganzen Länge des Spektrums *r b*. Wenn in dem von der Lichtquelle ausgehenden Lichte Strahlen von allen kontinuierlich ineinander übergehenden Stufen der Brechbarkeit vorkommen, kann man zwar nicht vollständig verhindern, daß die nächsten benachbarten Bilder der Lichtquelle sich decken, aber man kann die Lichtquelle und ihre Bilder so schmal machen, daß sich nur noch solche Bilder decken, welche Farben angehören, für welche die Unterschiede der Brechbarkeit verschwindend klein sind.

Wenn die Lichtquelle ein sehr feiner Spalt ist, durch den zusammengesetztes Licht fällt, so bildet jeder einzelne Punkt des Spaltes nach der eben gemachten Auseinandersetzung ein linienförmiges Spektrum. Das prismatische Bild des ganzen Spaltes erscheint demnach dem Beobachter als ein farbiges Rechteck, dessen der Lichtquelle zugekehrtes Ende rot, das entgegengesetzte violett ist. Dazwischen finden sich allmählich ineinander übergehend eine Reihe anderer Farben, nämlich, vom Rot anfangend, zunächst Orange, dann Gelb, Grün, Blau, endlich Violett. Man nennt ein solches durch das Prisma mit getrennten Farben entworfenes Bild einer Lichtlinie ein prismatisches Spektrum, und zwar ist es, nach der bisher beschriebenen Beobachtungsweise entworfen, ein subjektives Spektrum, da es nur einem virtuellen Bilde der Lichtquelle entspricht. Man kann es aber auch zu einem reellen Bilde machen, indem man hinter das Prisma da, wo sich bisher das Auge des Beobachters befand, eine Sammellinse aufstellt, welche die durch das Prisma gebrochenen Lichtstrahlen zu einem reellen Bilde von *r b* in oder hinter ihrem Brennpunkte vereinigt. So erhält man ein objektives Spektrum. Ein solches wird schon bei der ersten Beobachtungsweise auf der Netzhaut des Beobachters entworfen. Wenn das von der Lichtquelle ausgehende Licht alle kontinuierlich ineinander übergehenden Grade der Brechbarkeit darbietet, ist, wie wir gesehen haben, auch das Spektrum eine kontinuierlich beleuchtete Fläche. Wenn aber von der Lichtquelle nur Licht von bestimmten einzelnen Werten der Brechbarkeit ausgeht, so kann das Spektrum auch nur so viele einzelne verschiedenfarbige Bilder der Lichtquelle enthalten, als Grade der Brechbarkeit unter den Strahlen vorkommen, und man wird dann die Lichtquelle und ihre Bilder so schmal machen können, daß das jeder Farbe angehörige Bild von seinen Nachbarn durch einen dunkeln Zwischenraum getrennt ist. So haben wir vorher angenommen, daß nur rotes und blaues Licht in dem Lichte des Punktes *a* Fig. 8 vorkäme, und gesehen, daß dann bei *b* ein blaues Bild, bei *r* ein rotes erscheint, beide durch den dunkeln Zwischenraum *b r* voneinander getrennt. Dasselbe ist natürlich der Fall, wenn nicht zwei, sondern zehn oder hundert oder tausend verschiedene Arten einfachen Lichtes in dem Lichte von *a* vorkommen.

Von dieser Art ist die Zusammensetzung des Sonnenlichts. Wenn wir ein möglichst vollkommenes Spektrum des Sonnenlichts herstellen, finden wir es

von einer großen Zahl dunkler Linien geteilt, den Fraunhoferschen Linien, aus deren Vorhandensein wir schließen müssen, daß gewisse Stufen der Brechbarkeit unter den Strahlen des Sonnenlichts nicht vorkommen. Je vollkommener die Trennung der Farben im Spektrum ist, desto größer ist auch die Zahl der dunkeln Linien. Die stärksten von ihnen sind von Fraunhofer und von Stokes mit Buchstaben bezeichnet worden, weil sie ein außerordentlich sicheres und bequemes Mittel abgeben, im Spektrum Strahlen von genau bestimmten Werten der Schwingungsdauer und Brechbarkeit immer wieder zu finden, und wir werden uns deshalb im folgenden auch dieser Bezeichnung bedienen, so oft es darauf ankommt, die Art einer Farbe genau zu bestimmen. Auf nebenstehender Tafel ist das Sonnenspektrum mit seinen dunkeln Linien abgebildet. Da die einzelnen Teile des Spektrums bei Prismen aus verschiedenen Stoffen verschiedenes Längenverhältnis haben, und wieder ein ganz anderes Verhältnis in den durch Diffraktion erzeugten Spektren, wo die Verteilung der Farben nur von ihrer Wellenlänge abhängt, so ist die Verteilung der Farben in einer solchen Zeichnung bis zu einem gewissen Grade willkürlich. In unserer Abbildung ist die Anordnung, wie es für die physiologischen Betrachtungen am wichtigsten schien, nach dem Prinzipe der musikalischen Skale getroffen, so daß Farben, deren Wellenlängen sich zueinander verhalten wie die zweier um ein halbes Tonintervall verschiedener Töne, überall gleich weit voneinander entfernt sind. Mathematisch ausgedrückt, entsprechen also gleiche Distanzen in der Zeichnung gleichen Unterschieden der Logarithmen der Schwingungsdauer. Die Ziffern auf der einen Seite bezeichnen die Anzahl der halben Tonintervalle, die Buchstaben auf der anderen bezeichnen die Namen der stärkeren dunkeln Linien, wie sie von Fraunhofer und Stokes gewählt worden sind.

Da in der Benennung der verschiedenen Farben einige Unsicherheit herrscht, wollen wir für das vorliegende Werk folgendes darüber festsetzen:

Rot nenne ich die Farbe des weniger brechbaren Endes des Spektrums, welche von der äußersten Grenze desselben bis etwa zur Linie *C* keine merkliche Änderung des Farbentons zeigt. Der Repräsentant unter den Farbstoffen ist etwa der Zinnober. Von ihm zu unterscheiden ist das Purpurrot, welches in seinen weißlicheren Abstufungen Rosenrot wird und dem reinen Rot gegenüber bläulich erscheint. Dieser Farbenton, für dessen gesättigteste Abstufung wir den Namen Purpur bewahren wollen, während die rötlicheren Abstufungen desselben Karminrot heißen mögen, kommt im Spektrum nicht vor, sondern kann nur durch Mischung seiner äußersten Farben, des Rot und Violett, hervorgebracht werden.

Von der Linie *C* bis zur Linie *D* geht das Rot über durch Orange, d. h. Gelbrot mit überwiegendem Rot, in Goldgelb, d. h. Gelbrot mit überwiegendem Gelb. Ersterem entspricht unter den metallischen Farbstoffen etwa die Mennige, letzterem die Bleiglätte (Bleioxyd).

Von *D* bis zur Linie *b* hin finden wir sehr schnelle Farbenübergänge. Zunächst folgt ein sehr schmaler Strich reinen Gelbs, welcher etwa dreimal so weit von *E* als von *D* absteht. Dann folgt Grüngelb und zwischen *E* und *b* reines Grün. Für das reine Gelb und Grün haben wir zwei sehr gute Repräsentanten unter den Malerfarben, nämlich für ersteres das fein niedergeschlagene, hellere chromsaure Bleioxyd (Chromgelb) und für das letztere das arsenigsaure Kupferoxyd (Scheelsches Grün).

Zwischen *E* und *F* geht das Grün durch Blaugrün in Blau über, zwischen *F* und *G* folgen verschiedene Töne des Blau. Wegen der verhältnismäßig großen Breite der blauen Töne in dem durch Brechung erzeugten Spektrum des Sonnenlichts hat Newton hier verschiedene Namen angewendet, englisch: *blue* und *indico*, lateinisch der Reihe nach *thalassinum*, *cyaneum*, *coeruleum*, *indicum*, worauf dann Violett, *violaceum*, folgt. Wir können den Namen Indigblau beibehalten für die nach *G* hinliegenden zwei Dritteile des Raumes *FG*. Für das weniger brechbare Blau des ersten Drittels von *FG* hat man bisher meist einfach den Namen Blau angewendet, auch wohl unrichtig Himmelblau, aber die Ähnlichkeit mit dem Himmelblau bekommt dieses Blau in einem Spektrum von bequemer Helligkeit nur durch die größere Lichtstärke, während das Indigblau, dem der Farbenton des blauen Himmels angehört, in einem solchen Spektrum für diesen Vergleich zu dunkel erscheint. Da nun der gemeine Sprachgebrauch den reinen Himmel als den Hauptrepräsentanten des Blau betrachtet, und ihm den Namen des Blau bewahrt, wenn er es mit weniger brechbarem Blau vergleicht, und letzteres bei einem solchen Vergleiche als grünlich bezeichnet, so können wir im wissenschaftlichen Sprachgebrauche nicht wohl das letztere einfach als Blau im Gegensatz zum Indigblau bezeichnen, und ich habe deshalb den Namen Cyanblau dafür gewählt mit Rücksicht auf die Bezeichnung *cyaneum* bei Newton für die grünlich blauen Töne des Spektrums. Zur Bezeichnung des Farbentons allein würde auch der Namen Wasserblau gut passen, denn große Massen sehr reinen Wassers (Genfer See, Gletschereis) zeigen in ihrem Innern in der Tat diese Farbe. Hat man z. B. längere Zeit in das Wasser des Genfer Sees an einem hellen Tage geblickt, und sieht zum Himmel auf, so erscheint dieser im Kontrast violett, oder selbst rosarot. Da indessen die Farbe der gewöhnlich gesehenen Wassermassen sehr weißlich ist, mit Ausnahme etwa tiefer Eisspalten, so ziehe ich vor, den Namen Wasserblau nur für die weißlichen Abstufungen des Cyanblau anzuwenden. Unter den Farbstoffen entspricht das Berliner Blau (Eisencyanürcyanid) dem Cyanblau, das Ultramarin dem Indigblau.

Jenseits der Linie *G* bis nach *H* oder *L* folgt Violett (Farbe der Veilchen); es ist von manchen Schriftstellern auch Purpur genannt worden. Violett und Purpur bilden den Übergang der Farbentöne von Blau und Rot. Wir wollen, wie gesagt, den Namen Purpur nur auf die rötlicheren Farbentöne dieses Übergangs anwenden, welche im Spektrum nicht vorkommen.

Schließlich folgt als Ende des Spektrums auf der brechbarsten Seite das Ultraviolett. Dieser Teil von *L* bis zum Ende bei *R* kann nur gesehen werden, wenn die bisher beschriebenen helleren Teile des Spektrums sehr sorgfältig abgeblendet sind. Die Anwesenheit von Lichtstrahlen besonderer Art an dieser Stelle lernte man zuerst durch die chemischen Wirkungen derselben kennen, und nannte sie deshalb unsichtbare chemische Strahlen. In Wahrheit sind diese Strahlen aber nicht unsichtbar, wenn sie auch allerdings das Auge verhältnismäßig viel schwächer affizieren, als die Strahlen des mittleren leuchtenden Teils des Spektrums zwischen den Linien *B* und *H*. Sobald man die letzteren durch geeignete Apparate vollständig entfernt, sind die ultravioletten Strahlen dem Auge ohne Schwierigkeit sichtbar, und zwar bis zum Ende des Sonnenspektrums. Ihre Farbe ist bei geringer Lichtintensität indigblau, bei größerer Intensität bläulichgrau. Am leichtesten nachgewiesen wird die Anwesenheit dieser Strahlen durch das Phänomen der Fluoreszenz. Beleuchtet

man nämlich mit ultraviolettem Lichte eine klare Lösung von saurem schwefelsaurem Chinin, so geht von allen Punkten dieser Lösung, welche von dem ultravioletten Lichte getroffen werden, weißbläuliches Licht nach allen Richtungen aus, welches etwa wie ein leuchtender Nebel erscheint, der die Lösung durchzieht. Untersucht man dies weißbläuliche Licht mit dem Prisma, so erkennt man, daß es nicht ultraviolettes Licht ist, sondern gemischtes weißliches Licht mittlerer Brechbarkeit. Am einfachsten kann man die Erscheinung deshalb so beschreiben: Solange die ultravioletten Strahlen auf die Chininlösung wirken, ist diese selbstleuchtend, und sendet gemischtes weißlichblaues Licht von mittlerer Brechbarkeit aus. Da nun das Auge für Licht der letzteren Art außerordentlich viel empfindlicher ist, als für ultraviolettes Licht, so nimmt es bei gewissen Graden der Lichtstärke von letzterem nicht das geringste wahr, bis es eine fluoreszierende Substanz trifft, und auf dieser wird dann das bisher unsichtbare Licht sichtbar. Zu den Körpern, welche das Phänomen der Fluoreszenz in hohem Grade zeigen, gehören außer dem Chinin noch das mit Uran gefärbte Glas, das Aesculin, Kaliumplatincyanür usw.

Da wir an den fluoreszierenden Substanzen keine andere Veränderung bemerken, die Fluoreszenz mag noch so oft hervorgerufen werden, da auch keine Wärme dabei zu verschwinden scheint, so müssen wir aus dem Gesetze von der Erhaltung der Kraft schließen, daß die lebendige Kraft des durch die Fluoreszenz erzeugten Lichtes nicht größer ist trotz seiner stärkeren Wirkung auf das Auge, als die des einfallenden ultravioletten Lichts. Genaue Untersuchungen über das Verhältnis der Helligkeit des durch Fluoreszenz veränderten und unveränderten ultravioletten Lichts sind noch nicht angestellt. Doch kann man aus gewissen Tatsachen, die später bei Beschreibung der Methoden erwähnt werden sollen, schließen, daß das erstere etwa 1200 mal heller ist als das letztere. Davon, daß die Helligkeit beider Lichter für das Auge wirklich außerordentlich verschieden sei, überzeugt man sich auch ohne Messung, wenn man ultraviolettes Licht, welches von allem brechbareren Lichte gehörig gereinigt und in einen Fokus vereinigt ist, erst auf einen nicht fluoreszierenden Schirm, z. B. weißes Porzellan, und dann auf Chinin fallen läßt. Daß das Sonnenspektrum, wenigstens nachdem das Sonnenlicht durch die Atmosphäre gegangen ist, wirklich nicht weiter reicht, als das Auge bei geeigneter Abblendung des helleren Lichts ultraviolettes Licht wahrnimmt, folgt daraus, daß auch, wenn man durch Quarzprismen und Quarzlinsen ein objektives Spektrum auf eine Chininlösung oder einen anderen fluoreszierenden Körper wirft, das Phänomen der Fluoreszenz nur genau ebenso weit auftritt, als das Auge ultraviolettes Licht wahrnehmen kann. Andererseits aber hat Stokes gefunden, daß das Spektrum des elektrischen Kohlenlichts, durch Quarzapparate auf einen fluoreszierenden Schirm geworfen, viel weiter reicht als das Sonnenspektrum. Seine Methode ist also in der Tat geeignet, auch noch brechbareres Licht sichtbar zu machen, als das Sonnenlicht enthält, und wir müssen daraus schließen, daß das Spektrum des durch die Atmosphäre gegangenen Sonnenlichts wirklich da aufhört, wo das Auge und die fluoreszierenden Körper die Grenze anzeigen. Über die Sichtbarkeit der brechbarsten Teile des elektrischen Kohlenlichts sind noch keine Versuche angestellt worden. Der Lichtbogen, welchen die magnetelektrisch induzierten Ströme der Neefschen Hammerapparate im luftleeren Raume geben, ist zwar verhältnismäßig reich an ultraviolettem Licht, verglichen mit der geringen Menge weniger brechbaren Lichtes,

welches er enthält, aber seine absolute Lichtstärke ist doch zu gering, um eine feinere prismatische Zerlegung zu gestatten.*

Auch am anderen Ende des Spektrums gelingt es bei sorgfältiger Abblendung des helleren gewöhnlich sichtbaren Lichts, Teile des Spektrums sichtbar zu machen, die für gewöhnlich unsichtbar bleiben. Genügende Abblendung ist hier sehr leicht durch ein rotes Glas, welches man in den Weg der Lichtstrahlen einschiebt, zu erreichen. Oder da die roten (mit Kupferoxydul gefärbten) Gläser viel Orange durchlassen, kann man nötigenfalls zu dem roten Glase noch ein blaues, mit Kobaltoxyd gefärbtes fügen, welches Orange absorbiert, aber das äußerste Rot ungeschwächt durchläßt. Aber es ist wenig, was man am roten Ende durch eine solche Beobachtungsweise gewinnt, verglichen mit der großen Ausdehnung des ultravioletten Spektrums. Der Streifen roten Lichts, welcher jenseits der Linie *A* hinzukommt, hat etwa die Breite des Abstandes *A B*. Der Farbenton des Rot ist bis zum äußersten Ende hin unverändert, und nähert sich keineswegs dem Purpur.

Am roten Ende reicht nun aber in der Tat das Sonnenspektrum weiter, als es vom Auge wahrgenommen wird. Bisher hat man die Anwesenheit solcher überroten Strahlen nur durch ihre Wärmewirkungen wahrnehmbar machen können, und sie deshalb dunkle Wärmestrahlen genannt. Da sie vom Glase, Wasser und vielen anderen durchsichtigen Substanzen stärker als die leuchtenden Strahlen absorbiert werden, so muß man Steinsalzprismen und Steinsalzlinsen anwenden, um die ganze Ausdehnung des dunkeln Wärmespektrums kennen zu lernen. Im prismatischen Spektrum ist die Breite des dunkeln Wärmespektrums jedenfalls eine beschränkte, weil nämlich, der Theorie der elastischen Ätherschwingungen gemäß, bei zunehmender Wellenlänge der Strahlen die Brechung sich einem Minimum nähert, welches nicht überschritten werden kann, und bei welchem die Dispersion der Farben aufhört. In Fig. 9 sind als horizontale Abszissen die Wellenlängen aufgetragen, und zwar von einem Anfangspunkte an gerechnet, der von *H* ebenso weit entfernt liegt wie der Punkt *b*, aber in der Verlängerung der Linie *b H*. Die Buchstaben *B* bis *H* entsprechen den Fraunhoferschen Linien und ihrer Stellung in einem Interferenzspektrum. Als vertikale Koordinaten sind die Brechungsverhältnisse für eines der von Fraunhofer benutzten Flintglasprismen aufgetragen.

| Linie | *B* | *C* | *D* | *E* | *F* | *G* | *H* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Brechungsverhältnis | 1,6277 | 1,6297 | 1,6350 | 1,6420 | 1,6483 | 1,6603 | 1,6711. |

Die Buchstaben $B_{,}$ bis $H_{,}$ bezeichnen die Stellung der dunkeln Linien in dem Spektrum dieses Flintglases. Die Grundlinie *Hb* entspricht dem Brechungsverhältnis 1,6070, welches für diese Glasart das Minimum ist, dem sich bei steigender Wellenlänge die Brechungsverhältnisse asymptotisch nähern müssen[1].

[1] Der Wert dieses Minimums ist nach der Berechnung von Baden Powell (Poggendorff XXXVII) genommen worden, dessen Interpolationsformel nahe genug mit den theoretisch abgeleiteten Formeln von Cauchy übereinstimmt.

* Durch Tränkung der Kohlen in Lösungen von Zink- oder Cadmiumsalzen kann man das Bogenlicht noch reicher an ultravioletten Strahlen machen. In noch höherem Grade geschieht dies, unter gleichzeitigem Zurücktreten der gewöhnlichen leuchtenden Strahlen, wenn man die Funken eines großen Induktoriums zwischen Elektroden aus Cadmium oder Magnesium überschlagen läßt. Strahlen von der Wellenlänge 257 erregen im Auge noch merkliche Fluoreszenz und erzeugen daher eine Lichtempfindung. N.

Die punktierte Kurve $H_{,} d$ drückt also die Brechbarkeit der Strahlen als Funktion der Wellenlänge aus, sie würde bei weiterer Fortsetzung sich asymptotisch der Grundlinie $Hb$ anschließen. Daraus folgt, daß, wenn wir uns das Brechungsspektrum $H_{,} B_{,}$ über sein rotes Ende bei $B_{,}$ fortgesetzt denken durch dunkle Wärmestrahlen, das Spektrum seine äußerste Grenze an der Grundlinie bei $H$ finden muß[1], welche von $B_{,}$ dem Ende des gewöhnlich sichtbaren Rot, ungefähr so weit absteht, wie $B$ von $F_{,}$ der Grenze zwischen Grün und Blau, eine Entfernung, die ungefähr der Hälfte der Länge des gewöhnlich sichtbaren Spektrums entspricht. Übrigens fällt es in der Fig. 9 leicht auf, wie in dem Brechungsspektrum $B_{,} H_{,}$, wenn man es mit dem Interferenzspektrum $BH$ vergleicht, die Strahlen des blauen Endes $F_{,} G_{,} H_{,}$ auseinandergezogen, die des roten Endes $B_{,} C_{,} D_{,}$ aneinandergedrängt sind. Dieses Zusammendrängen der Strahlen im Brechungsspektrum muß natürlich zunehmen, je mehr man sich im Raum der dunkeln Wärmestrahlen der Grenze nähert. Am blauen Ende, wo das Spektrum gedehnt ist, wird dabei die Zahl der sichtbaren dunkeln Linien größer, und weil die gleiche Quantität Licht oder Wärme über einen größeren Raum verbreitet ist, werden Helligkeit und Erwärmung geringer. Umgekehrt am roten Ende wird die Zahl der sichtbaren dunkeln Linien geringer, Helligkeit und Erwärmung größer, als in dem Interferenzspektrum. Wenn also auch das Wärmemaximum im prismatischen Spektrum außerhalb des Rots liegt, so folgt daraus nicht, daß die dunkeln Wärmestrahlen der betreffenden Wellenlänge in größerer Menge im Sonnenlicht vorhanden seien, als irgend eine Art leuchtender Strahlen; im Gegenteil scheint im Interferenzspektrum das Wärmemaximum auf Gelb zu fallen.

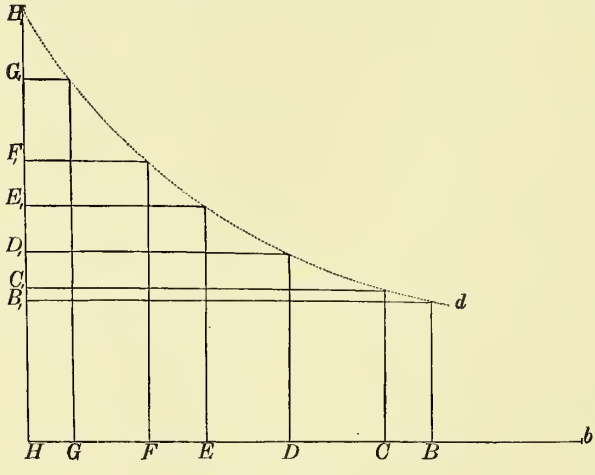


Fig. 9.

Die Bestimmung der größten Wellenlängen, welche in den dunkeln Wärmestrahlen des Sonnenlichts vorkommen, ist äußerst schwierig, eben wegen der beschriebenen Eigentümlichkeiten des Brechungsspektrums. Für diejenigen, welche durch Flintglas gehen, hat Fizeau die größte Wellenlänge nach einer Methode, die keine wesentlichen Einwände zuläßt, gefunden gleich 0,001940 mm. Es ist dies mehr als die doppelte Wellenlänge der äußersten roten Strahlen, die nach meinen Messungen 0,00081 mm beträgt. Es zeigen übrigens diese dunkeln Wärmestrahlen die Erscheinungen der Interferenz, wie die Lichtstrahlen, woraus folgt, daß sie wie diese in einer schwingenden Bewegung bestehen; sie zeigen genau dieselben Gesetze der Polarisation, woraus folgt, daß auch in

[1] Diese Grenze scheint nach einer Bemerkung von Fr. Eisenlohr in den Versuchen von Melloni wirklich erreicht zu sein. Kritische Zeitschr. für Chemie. Erlangen 1858. S. 229. [In der 2. Aufl. folgt hier der Satz: Theoretisch ist eine solche durchaus zu erwarten. Langley, Phil. Magaz. Vol. 21. p. 349 (1886) hat aber bei seinen Beobachtungen über dunkle Strahlen, die viel weiter gehen als alle bisherigen, keine solche Grenze erreicht.]

ihnen die Schwingungsrichtung senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung ist, und unterscheiden sich also von den leuchtenden Strahlen nur durch ihre größere Wellenlänge und die damit verbundene geringere Brechbarkeit.

Der Grund für die Unsichtbarkeit der überroten Strahlen könnte entweder darin zu finden sein, daß sie von den Augenmedien absorbiert werden, oder daß die Netzhaut für sie nicht empfindlich ist. Daß Wasser die dunkeln Wärmestrahlen in hohem Maße absorbiert, hat schon Melloni nachgewiesen. Mit den durchsichtigen Mitteln des Ochsenauges haben Brücke und Knoblauch Versuche angestellt. Es wurden nämlich Hornhaut, Glaskörper und Linse eines Ochsenauges in eine passende röhrenförmige Fassung so eingeschaltet, daß Hornhaut und Linse die vordere und hintere Begrenzung bildeten, der Glaskörper zwischen beiden lag. Durch dieses vollkommen durchsichtige System fiel Sonnenlicht, von einem Heliostaten in ein dunkles Zimmer geworfen, auf eine thermoelektrische Säule. Es brachte eine Ablenkung des damit verbundenen Multiplikators von 26 bis 30° hervor. Nachdem aber die beiden Seiten des Auges über einer Terpentinflamme berußt waren, was vollkommen gut und, wie die nachherige Untersuchung zeigte, ohne alle sonstige Veränderung der Hornhaut und Linse gelang, konnte keine Wärme mehr durch das Auge hindurchstrahlen. Rußschichten sind aber für die dunkeln Wärmestrahlen durchgängig, nicht für die leuchtenden. Hätte also ein Teil der durch die Augenmedien gehenden Strahlen aus dunkeln Wärmestrahlen bestanden, so hätte sich von diesen auch noch nach der Berußung eine Wirkung zeigen müssen. Es läßt sich durch diesen Versuch allerdings nicht genau nachweisen, daß die Grenzen der Sichtbarkeit des Rot mit den Grenzen der Diathermansie der Augenmedien zusammentreffen, aber jedenfalls steht fest, daß von den unsichtbaren überroten Strahlen wenig oder nichts mehr zur Netzhaut gelangen kann, und es scheint dieser Umstand zu genügen, um ihre Unsichtbarkeit zu erklären.

Cima[1] hat ähnliche Versuche angestellt, wobei er als Wärmequelle eine Locatellische Lampe benutzte, deren Strahlen durch die Augenmedien auf eine thermoelektrische Säule fielen. Er fand, daß die Kristallinse 13 %, der Glaskörper allein 9 % und das ganze Auge auch 9 % der einfallenden Wärme durchließ.*

Daß die übervioletten Strahlen die Augenmedien durchdringen können, folgt direkt schon aus der Möglichkeit, das überviolette Spektrum mit seinen dunkeln Linien zu sehen. Donders und Rees haben objektiv nachgewiesen, daß diese Strahlen durch Glasgefäße, welche mit Glasfeuchtigkeit vom Ochsen gefüllt waren, und in die auch Hornhaut und Linse eingebracht wurden, ohne auffallend geschwächt zu werden, hindurchgehen. Um das ultraviolette Licht nach dem Durchgange durch die Augenflüssigkeiten sichtbar zu machen, fingen

[1] *Sul potere degli umori dell' occhio a trasmettere il calorico raggionante.* Torino 1852.

* Auch J. Janssen (C. R. LI. 128—131; 373—374; Ann. der Chir. (3) XL. 71—93) und R. Franz (Poggendorff's Ann. CXV. 26—279) fanden die Absorption im Glaskörper der im Wasser sehr ähnlich, in Hornhaut und Linse etwas stärker. Th. W. Engelmann (Onderzoek. physiol. Lab. Utrecht. 3. Reeks, D. VII. Bl. 291, 1882) kam zu ähnlichen Resultaten.

Über die Absorption des Ultraviolett im Auge ist nachzutragen, daß nach den Untersuchungen von Soret u. a. die Strahlen zwischen den Fraunhoferschen Linien *H* und *Q* wenig, die noch kürzerwelligen dagegen stark absorbiert werden. Vgl. Soret, C. R. **88**, 1012; **97**, 314, 572, 642; Chardonnet, C. R. **96**, 509; Mascart, C. R. **96**, 571. N.

sie es auf der Fläche einer Chininlösung auf, wo es die blaue Fluoreszenz hervorrief. Brücke hatte ähnliche Versuche schon früher angestellt, bei denen er die Wirkung des Lichts auf Guajaklösung und auf photographisches Papier untersuchte, nachdem es durch die Augenmedien gegangen war.

Guajakharz, frisch aus der alkoholischen Lösung durch Eintrocknen im Dunkeln gewonnen, wird von den blauen, violetten und übervioletten Strahlen blau gefärbt, von den schwächer brechbaren wieder entbläut. Im gewöhnlichen Tageslichte überwiegt die Wirkung der bläuenden Strahlen. Tageslicht aber, welches durch die Kristallinse eines Ochsenauges gegangen ist, färbt das Harz nur gelbgrün, und eine schon gebläute Harzschicht wird durch dasselbe Licht wieder bis zu demselben Gelbgrün entbläut. Daraus folgt, daß die Linse die bläuenden Strahlen des Tageslichts stärker absorbiert, als die nicht bläuenden. Bei starker Absorption der gewöhnlich sichtbaren blauen und violetten Strahlen müßte die Linse selbst gelblich gefärbt erscheinen. Da sie im normalen Zustande ziemlich ungefärbt erscheint, so können es unter den Guajak bläuenden Strahlen nur die übervioletten sein, welche die Linse verhältnismäßig beträchtlich absorbiert. Für die Hornhaut und den Glaskörper ergeben ähnliche Versuche von Brücke, daß sie eine ähnliche Wirkung wie die Linse, aber in viel schwächerem Grade besitzen. Damit stimmt überein, daß die Hornhaut und Linse des Auges, wie man auch am lebenden Auge leicht sehen kann, selbst einen ziemlichen Grad von Fluoreszenz besitzen, wenn violettes oder übervioletttes Licht auf sie fällt. Sie strahlen dabei weißblaues Licht aus, ähnlich dem der Chininlösungen. Fluoreszierende Körper aber absorbieren stets merklich die Strahlen, durch welche ihre Fluoreszenz erregt wird.

Andere Versuche wurden von Brücke mit photographischem Papier von C. Karsten angestellt. Hornhaut, Glaskörper und Linse waren wie bei den erwähnten thermoelektrischen Versuchen in eine Messingfassung gebracht. Er ließ die Strahlen eines prismatischen Sonnenspektrums hindurchgehen und brachte das lichtempfindliche Papier im Brennpunkte der Augenmedien an. Violette Strahlen gaben nach $1^1/_2$ Minuten einen völlig schwarzen Punkt. In der Nähe der Liniengruppe *M* (nach Draper) verschwand die Wirkung auf das Papier ganz, so daß selbst nach 10 Minuten keine sichtbare Wirkung mehr zu erkennen war. Dabei ist indessen zu bemerken, daß auch ohne Einschaltung der Augenmedien die photographische Wirkung der übervioletten Strahlen bei den meisten lichtempfindlichen Präparaten gegen das Ende des Spektrums schnell abnimmt. Die seit den beschriebenen Versuchen von Brücke entdeckte Fluoreszenz ist namentlich für die brechbarsten Strahlen ein viel empfindlicheres Mittel der Wahrnehmung, als die photographische Wirkung, und wir haben mit ihrer Hilfe das Spektrum in viel größerer Ausdehnung kennen gelernt als früher. Ja, selbst die direkte Beobachtung mit dem Auge bei gehörig abgeblendetem Licht der helleren Teile des Spektrums scheint die Ausdehnung des übervioletten Spektrums besser kennen zu lehren, als die photographischen Darstellungen des Überviolett es tun.

Wenn nun auch die Versuche von Brücke lehren, daß die ultravioletten Strahlen beim Durchgang durch die Augenmedien, namentlich die Kristallinse, merklich geschwächt werden, wie namentlich bei der Wirkung auf Guajaktinktur sich zu erkennen gibt, so lehren andererseits doch die Versuche von Donders, daß diese Schwächung nicht so bedeutend ist, um bei der gewöhnlichen Vergleichung der Helligkeit durch das ununterstützte Auge aufzufallen. Andererseits ist schon oben angeführt worden, daß die Helligkeit des unveränderten ultravioletten Lichts gegen die des ungefähr gleich aussehenden durch Fluoreszenz

des Chinins erzeugten Lichts sich etwa wie 1 : 1200 verhält. Daraus schließen wir, daß Absorption des Lichts in den Augenmedien nur zum allerkleinsten Teile schuld sein kann an der geringen subjektiven Helligkeit des Ultraviolett, daß diese vielmehr in der Unempfindlichkeit der Netzhaut ihren Grund haben muß.

Zu erwähnen ist noch, daß der Farbeneindruck, welchen einfaches Licht im Auge hervorruft, abhängig ist von der Lichtintensität, in der Weise, daß alle einfachen Farben bei gesteigerter Helligkeit sich dem Weiß oder Weißgelb nähern. Am leichtesten geschieht dies mit dem Violett, welches sich desto mehr vom Blau entfernt und dem Purpur nähert, je lichtschwächer es ist, und im Gegenteil bei einem mäßigen Grade von Helligkeit, wie ihn das Spektrum der Sonne im Fernrohr leicht erreicht, schon weißgrau erscheint, und nur einen schwachen bläulich violetten Schein behält. Nach einer Beobachtung von Moser sieht man dies auch sehr gut, wenn man bei halb bewölktem Himmel sich die Sonne mit einem ziemlich dunkeln violetten Glase bedeckt. Dann erscheint die Sonnenscheibe, durch das Glas gesehen, vollständig ebenso weiß, wie, neben dem Glase vorbei gesehen, die hellbeleuchteten Wolken erscheinen. Ebenso wird das Blau des Spektrums bei geringer Helligkeit mehr indigblau, bei größerer himmelblau, und bei noch größerer, welche übrigens immer noch ohne Belästigung des Auges zu ertragen ist, weißblau, endlich weiß. Daher die oben erwähnte fälschliche Anwendung der Benennung Himmelblau für das brechbarere und gleichzeitig lichtstärkere Cyanblau des Spektrums. Das Grün geht durch Gelbgrün in Weiß, Gelb direkt in Weiß über, aber erst bei blendender Helligkeit. Rot zeigt die Erscheinung am schwersten, und nur bei den höchsten Graden der Helligkeit habe ich es sowohl im Spektrum, als durch ein rotes Glas nach der Sonne blickend, hellgelb werden sehen. Alle diese Versuche gelingen gleich gut mit sorgfältig gereinigtem einfachem, wie mit gemischtem Lichte von der betreffenden Farbe, wie es durch gefärbte Gläser gegeben wird.

Unter allen Teilen des Spektrums ist der Farbenton des violetten und übervioletten Lichts am veränderlichsten bei veränderter Lichtstärke. Um Farbentöne des brechbarsten Endes miteinander zu vergleichen, muß man sie nahe auf gleiche Intensität bringen. Bei schwacher Helligkeit nähern sich die blauen Töne des Spektrums mehr dem Indigo, das Violett dem Rosa, wie schon angegeben wurde; etwa von der Linie *L* ab bis zum Ende des Spektrums findet aber eine Umkehr in der Reihe der Farben statt; der Farbenton wird nämlich nicht weiter dem Rosa ähnlicher, sondern kehrt von hier wieder zum Indigblau zurück. Bei mäßiger Steigerung der Lichtstärke dagegen erscheint das überviolette Licht bläulich weißgrau, weißlicher als gleich starkes indigblaues Licht, und man hat es deshalb auch lavendelgrau genannt.

Die Umkehr in der Farbenreihe, welche das überviolette Licht bei geringer Helligkeit zeigt, beruht wahrscheinlich nicht auf der Reaktionsweise des Nervenapparats, sondern scheint dadurch bedingt zu sein, daß die Netzhaut selbst fluoresziert, d. h. unter der Einwirkung übervioletter Strahlen Licht niederer Brechbarkeit, und zwar solches von grünlichweißer Farbe aussendet. Wenigstens die Netzhaut aus dem Auge einer Leiche, welche ich selbst[1] untersuchte, und die Netzhäute aus ganz frischen Augen von eben getöteten Ochsen und

[1] Poggendorffs Ann. XCIV. 205.

Kaninchen, welche Setschenow[1] untersuchte, zeigten einen freilich sehr geringen Grad von Fluoreszenz, und das Licht, welches sie dabei aussandten, hatte die angegebene Farbe. Die Stärke ihrer Fluoreszenz war geringer, als die von Papier, Leinwand und Elfenbein, aber erschien doch immer noch stark genug, um die Farbe, in der das überviolette Licht empfunden wird, verändern zu können. Ich verglich zu diesem Ende das Licht, was durch Fluoreszenz der Netzhaut erzeugt wurde, und sich von den fluoreszierenden Stellen dieser Membran nach allen Seiten in den Raum hinein verbreitete, mit ultraviolettem Licht, welches diffus von einem weißen Porzellanplättchen reflektiert wurde, also ebenso wie jenes sich nach allen Seiten in den Raum hinein verbreitete. Die Netzhaut und das Porzellanplättchen wurden durch ein schwach brechendes Prisma angesehen, welches das veränderte von dem unveränderten ultravioletten Lichte schied. Es erschien unter diesen Umständen das durch Fluoreszenz in der Netzhaut erzeugte Licht ungefähr ebenso hell, wie die unveränderte ultraviolette Beleuchtung der Porzellanplatte. Wenn wir nun annehmen, was unbedenklich erscheint, daß die Netzhaut das in ihrer eigenen Substanz durch Fluoreszenz erzeugte Licht empfindet, so muß ihre Empfindung bei übervioletter Bestrahlung zu ziemlich gleichen Teilen zusammengesetzt sein aus derjenigen Empfindung, die das überviolette Licht direkt erregt, und derjenigen, welche das der Fluoreszenz erregt. Da nun das letztere weißer und mehr grünlich ist, als das überviolette Licht dem Auge erscheint, so muß die direkte Empfindung des übervioletten Lichts, wie sie sein würde in einer nicht fluoreszierenden Netzhaut, dem reinen Violett ähnlicher sein. Denn Violett und Grünlichweiß würde bei passender Mischung das Lavendelgrau der übervioletten Strahlen geben können. Da die Farbe der Fluoreszenz der Netzhaut von Lavendelgrau beträchtlich abweicht, können wir nicht annehmen, daß eine direkte Reizung des Sehnervenapparats durch das überviolette Licht ganz fehlt, und etwa nur das fluoreszierende Licht der Netzhaut empfunden würde.

Wenn man ein prismatisches Spektrum von geringer Länge betrachtet, so daß man das Ganze gleichzeitig vor Augen hat, so erscheint es nur aus vier Farbenstreifen zusammengesetzt: Rot, Grün, Blau und Violett, während durch den Kontrast mit diesen Hauptfarben ihre Übergänge fast ganz verschwinden, höchstens erkennt man noch, daß das Grün an der Seite des Rot gelblich wird. Noch verstärkt wird die Trennung der Farben dadurch, daß drei von den stärkeren dunkeln Linien des Sonnenspektrums *D*, *F* und *G* ungefähr den Grenzen der genannten vier Farben entsprechen. Aber auch, wenn man die Linien nicht erkennen kann, tritt dieselbe Scheidung der Farben ein. Bei längeren Spektris gelingt es zwar eher die Übergangsfarben zu erkennen, indessen wird doch immer der Eindruck im Auge durch die Nachbarschaft von so lebhaften und gesättigten Farben, wie sie das Spektrum zeigt, beträchtlich verändert, so daß die Übergangsfarben nicht recht ungestört zur Erscheinung kommen. Um die Reihe der einfachen Farben genau kennen zu lernen, muß man sie isolieren. Zu dem Ende entwirft man ein recht reines objektives Spektrum auf einem Schirme, der einen schmalen Spalt hat, so daß nur ein schmaler Farbenstreifen des Spektrums durch den Spalt dringen und einen dahinter aufgestellten weißen Schirm erleuchten kann. Indem man den Spalt langsam die Länge des Spektrums durchwandern läßt, bekommt man nach-

[1] Graefes, Archiv für Ophthalmologie. Bd. V. Abt. 2. S. 205.

einander die Reihe der Farbentöne, die es enthält, einzeln zur Anschauung. Dabei zeigt sich, daß nirgends ein Sprung in der Farbenreihe ist, sondern die Farbentöne kontinuierlich ineinander übergehen. Es ist dieser Versuch gleichzeitig eines der prachtvollsten Schauspiele, welches die Optik darbietet, wegen des Reichtums, der intensiven Sättigung und der zarten Übergänge der Farbentöne.

Wegen der allmählichen Übergänge ist es auch unmöglich, den einzelnen Farben im Spektrum naturgemäß eine bestimmte Breite anzuweisen. Um die Stelle und Verteilung der Farben, so weit es möglich ist, zu bezeichnen, will ich hier die den Fraunhoferschen Linien entsprechenden Farbentöne hersetzen mit ihren Wellenlängen, letztere ausgedrückt durch Milliontel eines Millimeters:

| Linie | Wellenlänge in $\mu\mu$ | Farbe |
|---|---|---|
| *A* | 760,40 | Äußerstes Rot |
| *B* | 686,853 | Rot |
| *C* | 656,314 | Grenze des Rot und Orange |
| *D* | 589,625<br>589,024 | Goldgelb |
| *E* | 526,990 | Grün |
| *F* | 486,164 | Cyanblau |
| *G* | 430,825 | Grenze des Indigo und Violett |
| *H* | 396,879 | Grenze des Violett |
| *L* | 381,96 | Überviolett |
| *M* | 372,62 | |
| *N* | 358,18 | |
| *O* | 344,10 | |
| *P* | 336,00 | |
| *Q* | 328,63 | |
| *R* | 317,98 | |
| *U* | 294,77 | |

Da der Unterschied der Farbenempfindung im Auge wie der der Tonhöhe im Ohre dem Unterschiede in der Schwingungsdauer der erregenden Licht- oder Tonwellen entspricht, so hat man vielfältig versucht, die Farbenstufen des Spektrum nach demselben Prinzipe abzuteilen, wie es bei den ganzen und halben Tönen in der musikalischen Tonleiter geschieht. Newton versuchte es zuerst. Da er aber noch nicht die Abhängigkeit der Breite, welche die einzelnen Farben im prismatischen Spektrum einnehmen, von der Natur der brechenden Substanz kannte, und der damals noch sehr unentwickelten Undulationstheorie des Lichts abgeneigt war, so teilte er unmittelbar das Spektrum von Glasprismen, so weit er es kannte, ungefähr zwischen den Linien *B* und *H*, in 7 Streifen ein, deren Breite dem Verhältnisse der Intervalle in einer Tonleiter d. h. den Zahlen $\frac{9}{8}, \frac{16}{15}, \frac{10}{9}, \frac{9}{8}, \frac{10}{9}, \frac{16}{15}, \frac{9}{8}$, proportional war, und unterschied, diesen sieben Intervallen entsprechend, sieben Hauptfarben, nämlich: Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo, Violett. Daß in dieser Reihe zwei Arten des Blau genannt sind, während Goldgelb, Gelbgrün, Meergrün fehlen, die dem Auge von den benachbarten Hauptfarben mindestens ebensogut verschieden erscheinen, wie Indigo von Cyanblau und Violett, rührt von der auf S. 57 erwähnten Eigentümlichkeit der Brechungsverhältnisse in den durchsichtigen Substanzen her, vermöge deren in jedem prismatischen Spektrum die brechbareren Farbentöne stärker ausgedehnt werden, als die weniger brechbaren.

In den Interferenzspektris, wo die Verteilung der Farben nur von der Wellenlänge, nicht von der Natur eines brechenden Mediums abhängt, ist der blauviolette Raum viel schmaler und würde bei einer ähnlichen Einteilung nicht in drei Streifen zerfallen sein, dagegen der Raum des Rot und Orange etwa drei eingenommen hätte.

Wenn wir jetzt mit Hilfe der seitdem gemachten Entdeckungen und Messungen das Spektrum einteilen, indem wir das Einteilungsprinzip der musikalischen Tonleiter auf die Schwingungsdauer der Lichtwellen anwenden, wie es oben in der Tafel, S. 54 geschehen ist, und das Gelb dem Grundtone *c*, die Linie *A* dem tieferen *G* entsprechend machen, so bekommen wir für die einzelnen halben Töne folgende Farbenstufen:

| | | | |
|---|---|---|---|
| *Fis.* | Ende des Rot | *fis.* | Violett |
| *G.* | Rot | *g.* | Überviolett |
| *Gis.* | Rot | *gis.* | Überviolett |
| *A.* | Rot | *a.* | Überviolett |
| *B.* | Rotorange | *b.* | Überviolett |
| *H.* | Orange | *h.* | Ende des Sonnenspektrums |
| *c.* | Gelb | | |
| *cis.* | Grün | | |
| *d.* | Grünblau | | |
| *dis.* | Cyanblau | | |
| *e.* | Indigblau | | |
| *f.* | Violett. | | |

Die Töne, welche Oktaven bilden, sind nebeneinander gestellt. Auf der Tafel (S. 54) sind rechts die den Tonintervallen entsprechenden Stellen durch Linien bezeichnet. Nach demselben Prinzip berechnet, würde die Grenze des Wärmespektrums nach Fizeau und Foucault etwa bei dem $Dis_{-1}$ (zwei Oktaven unter dem Cyanblau) und wenn man die Annäherungsformel von Cauchy für die Berechnung der Wellenlänge aus der Brechbarkeit so weit ausdehnen darf, die äußerste Grenze des elektrischen Kohlenlichts bei $\overline{h}$, eine Oktave höher als die Grenze des Sonnenspektrums liegen.

Aus der gegebenen Vergleichungstafel der halben Töne und Farbenstufen geht nun hervor, daß an beiden Grenzen des Spektrums die Farbe sich innerhalb mehrerer halber Tonstufen nicht merklich ändert, in der Mitte dagegen die sehr mannigfaltigen Übergangsfarben des Gelb in Grün alle in die Breite eines einzigen halben Tones zusammengedrängt sind. Daraus folgt, daß in der Mitte des Spektrums das Auge für die Änderung der Schwingungsdauer des Lichts viel empfindlicher ist, als an den Enden des Spektrums, und daß die Farbenstufen ihrer Größe nach keineswegs in ähnlicher Weise von der Schwingungsdauer abhängen, wie die Abstufungen der Tonhöhe.

Da die vorliegenden physiologischen Untersuchungen eine viel genauere Scheidung des einfachen Lichts voneinander notwendig machen, als es bei physikalischen Untersuchungen im allgemeinen erfordert wird, will ich hier die Theorie der Brechung in Prismen untersuchen, so weit sie für die Herstellung reiner Spektra nötig ist. Man hat bisher, soviel ich gefunden habe, immer nur die Brechung einzelner Lichtstrahlen in den Prismen untersucht, aber nicht die Lage und Beschaffenheit der prismatischen Bilder, und doch, wenn man mit dem Auge durch ein Prisma sieht, oder das aus dem Prisma tretende

Licht durch Linsen und Fernröhre gehen läßt, kommt es wesentlich darauf an, die prismatischen Bilder für jede Art homogenen Lichts zu kennen, denn sie sind dann als die Objekte zu betrachten für die weiteren optischen Bilder, welche die Augenmedien und Linsen entwerfen. Um diese Lücke auszufüllen, werde ich im folgenden darangehen, den Ort und die Beschaffenheit des prismatischen Bildes zu bestimmen, wenn auch diese Untersuchung nicht eigentlich in die physiologische Optik gehört. Wohl aber sind ihre Resultate wichtig für jeden, der reine prismatische Spektra herstellen will.

Im allgemeinen sind homozentrische Strahlen, nachdem sie durch ein Prisma gebrochen worden sind, nicht mehr homozentrisch, sondern ein jedes unendlich dünne Strahlenbündel hat zwei Vereinigungsweiten der Strahlen, ähnlich wie es bei homozentrischen Strahlen der Fall ist, welche von ellipsoidischen Flächen, oder bei schiefem Einfall von Kugelflächen gebrochen sind[1]. Um die Betrachtung dieser Verhältnisse zu erleichtern, will ich eine Form des Brechungsgesetzes benutzen, welche bald nach seiner Entdeckung durch Fermat aufgefunden wurde, und welche es namentlich für die Untersuchung solcher Fälle bequem macht, bei denen die einzelnen Teile desselben Strahls nicht alle in einer Ebene liegen.

**Definition.** Wenn ein Strahl durch verschiedene brechende Mittel hindurchgeht, und man die Länge seines Weges in jedem einzelnen Mittel mit dem Brechungsverhältnisse dieses Mittels multipliziert, und alle diese Längen addiert, so nenne ich die Summe die optische Länge des Strahls.

Es seien $r_1$, $r_2$, $r_3$ usw. die Weglängen des Strahls im ersten, zweiten, dritten Mittel, und $n_1$, $n_2$, $n_3$ die zugehörigen Brechungskoeffizienten, so ist die optische Länge $\Psi$ nach dieser Definition

$$\Psi = n_1 r_1 + n_2 r_2 + n_3 r_3 \text{ usw. } + n_m r_m .$$

Nennen wir die Geschwindigkeit des Lichts im leeren Raume $c_0$, in dem ersten, zweiten, dritten usw. brechenden Mittel dagegen $c_1$, $c_2$, $c_3$, so ist (nach § 9, S. 36)

$$n_1 = \frac{c_0}{c_1}, \qquad n_2 = \frac{c_0}{c_2}, \qquad n_3 = \frac{c_0}{c_3} \ldots n_m = \frac{c_0}{c_m},$$

also

$$\Psi = c_0 \left[ \frac{r_1}{c_1} + \frac{r_2}{c_2} + \frac{r_3}{c_3} + \text{usw. } + \frac{r_m}{c_m} \right].$$

Nenne ich nun $t$ die Zeit, welche das Licht gebraucht, um vom Anfang bis zum Ende des hier betrachteten Weges zu gelangen, so ist

$$t = \frac{r_1}{c_1} + \frac{r_2}{c_2} + \frac{r_3}{c_3} + \text{usw. } + \frac{r_m}{c_m},$$

also

$$\Psi = c_0 t .$$

Die optische Länge ist also proportional der Zeit, in der das Licht die Länge des Strahls durchläuft, und ist gleich dem Wege, welchen das Licht in derselben Zeit im leeren Raume zurückgelegt haben würde.

[1] Siehe S. 142 u. 143. Die nun folgenden Theoreme können auch für das zitierte Kapitel von den monochromatischen Abweichungen des Auges verwendet werden.

Es kann der Begriff der optischen Länge auch angewendet werden auf den Fall, wo man den Strahl des letzten Mittels rückwärts verlängert denkt bis über die Grenze des Mittels hinaus, etwa bis zu einem Punkte hin, wo ein potentielles Bild des leuchtenden Punktes sich befindet. Um die optische Länge zwischen dem leuchtenden Punkte und seinem potentiellen Bilde zu bestimmen, verfährt man dann wie vorher, nur rechnet man die Entfernung vom Eintritt des Strahls in das letzte Mittel bis zu dem potentiellen Bilde gemessen negativ. Die hier folgenden analytischen Sätze werden dadurch nicht geändert.

I. **Lehrsatz.** Das Brechungsgesetz der Lichtstrahlen läßt sich durch die Bedingung ausdrücken, daß die optische Länge des Strahls zwischen einem ihm angehörigen Punkte im ersten und im zweiten Mittel ein Grenzwert (Maximum oder Minimum) sein solle.

Die beiden brechenden Mittel mögen durch eine beliebig gestaltete Fläche von kontinuierlicher Krümmung getrennt sein; das Koordinatensystem wollen wir so wählen, daß das Einfallslot die Achse der $z$ sei, die Gestalt der brechenden Fläche sei gegeben, indem $z$ als Funktion von $x$ und $y$ bestimmt ist. Für den Einfallspunkt wird

$$x = y = z = 0, \qquad \frac{dz}{dx} = 0, \qquad \frac{dz}{dy} = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1).$$

Ferner seien $a_1$, $b_1$, $c_1$ die Koordinaten eines Punktes im einfallenden Strahle, $a_2$, $b_2$, $c_2$ die eines Punktes im gebrochenen Strahle. Verbinden wir diese Punkte mit einem Punkte der brechenden Fläche, dessen Koordinaten $x$, $y$, $z$ sind, so ist die optische Länge dieses Weges

$$\Psi = n_1 \sqrt{(a_1 - x)^2 + (b_1 - y)^2 + (c_1 - z)^2} + n_2 \sqrt{(a_2 - x)^2 + (b_2 - y)^2 + (c_2 - z)^2}.$$

Damit $\Psi$, welches eine Funktion der unabhängigen Variablen $x$ und $y$ ist, ein Maximum oder Minimum werde, sind die ersten Bedingungen, welche hier schon genügend sind:

$$\frac{d\Psi}{dx} = 0, \qquad \frac{d\Psi}{dy} = 0,$$

oder

$$\left.\begin{aligned} 0 = n_1 \frac{x - a_1 + (z - c_1)\frac{dz}{dx}}{\sqrt{(a_1 - x)^2 + (b_1 - y)^2 + (c_1 - z)^2}} \\ + n_2 \frac{x - a_2 + (z - c_2)\frac{dz}{dx}}{\sqrt{(a_2 - x)^2 + (b_2 - y)^2 + (c_2 - z)^2}} \\ 0 = n_1 \frac{y - b_1 + (z - c_1)\frac{dz}{dy}}{\sqrt{(a_1 - x)^2 + (b_1 - y)^2 + (c_1 - z)^2}} \\ + n_2 \frac{y - b_2 + (z - c_2)\frac{dz}{dy}}{\sqrt{(a_2 - x)^2 + (b_2 - y)^2 + (c_2 - z)^2}} \end{aligned}\right\} \quad 2).$$

Für den Einfallspunkt des gebrochenen Strahls werden diese Gleichungen nach den in 1) gegebenen Bestimmungen

$$\left.\begin{aligned} 0 &= n_1 \frac{a_1}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2 + c_1^2}} + n_2 \frac{a_2}{\sqrt{a_2^2 + b_2^2 + c_2^2}} \\ 0 &= n_1 \frac{b_1}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2 + c_1^2}} + n_2 \frac{b_2}{\sqrt{a_2^2 + b_2^2 + c_2^2}} \end{aligned}\right\} \quad 2a).$$

Wenn wir nun die Lage der Punkte $a_1$, $b_1$, $c_1$ und $a_2$, $b_2$, $c_2$ in der gewöhnlichen Weise durch Polarkoordinaten ausdrücken, d. h. setzen

$$\left.\begin{aligned} a_1 &= r_1 \sin\alpha_1 \cos\vartheta_1 & a_2 &= r_2 \sin\alpha_2 \cos\vartheta_2 \\ b_1 &= r_1 \sin\alpha_1 \sin\vartheta_1 & b_2 &= r_2 \sin\alpha_2 \sin\vartheta_2 \\ c_1 &= r_1 \cos\alpha_1 & c_2 &= r_2 \cos\alpha_2 \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots 3),$$

so verwandeln sich die Gleichungen 2a) in folgende:

$$\left.\begin{aligned} n_1 \sin\alpha_1 \cos\vartheta_1 &= -\, n_2 \sin\alpha_2 \cos\vartheta_2 \\ n_1 \sin\alpha_1 \sin\vartheta_1 &= -\, n_2 \sin\alpha_2 \sin\vartheta_2 \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots 2b).$$

Beide in das Quadrat erhoben und addiert, geben

$$n_1^2 \sin^2\alpha_1 = n_2^2 \sin^2\alpha_2,$$

d. h.

$$n_1 \sin\alpha_1 = \pm\, n_2 \sin\alpha_2.$$

Es paßt hier nur das positive Zeichen, weil $\alpha_1$ zwischen $0^0$ und $90^0$, $\alpha_2$ aber nach der hier gewählten Bezeichnung zwischen $90^0$ und $180^0$ liegen muß, also $\sin\alpha_1$, $\sin\alpha_2$, sowie auch $n_1$ und $n_2$ immer positiv sind. Es ist also

$$n_1 \sin\alpha_1 = n_2 \sin\alpha_2 \quad \ldots\ldots\ldots 4).$$

und wenn man dies in die Gleichungen 2b) einsetzt, erhält man

$$\cos\vartheta_1 = -\cos\vartheta_2,$$
$$\sin\vartheta_1 = -\sin\vartheta_2,$$

d. h.

$$\vartheta_2 = \vartheta_1 + 180^0 \quad \ldots\ldots\ldots 4a).$$

Die Gleichungen 4) und 4a), welche wir aus der Bedingung hergeleitet haben, daß die optische Länge des Strahls ein Grenzwert sei, sind aber identisch mit den beiden Bedingungen des Brechungsgesetzes. Es ist nämlich, wie aus den Gleichungen 3) hervorgeht, $\alpha_1$ der Brechungswinkel, $\vartheta_1$ der Winkel, den die $xz$-Ebene mit der Einfallsebene, $\vartheta_2$ der, den die $xz$-Ebene mit der Brechungsebene macht. Einfalls- und Brechungsebene machen also miteinander einen Winkel von $180^0$, d. h. fallen in eine Ebene zusammen. Genau dieselbe Beweisführung paßt auf das Problem der Spiegelung des Strahls an der bisher als brechend vorausgesetzten Fläche. Man hat nur $n_1 = n_2$ zu setzen, weil der Strahl in demselben Mittel bleibt, und $\alpha_2$ ist wie $\alpha_1$ zwischen $0^0$ und $90^0$ zu nehmen. Dann werden die Gleichungen 4) und 4a)

$$\sin\alpha_1 = \sin\alpha_2 \text{ oder } \alpha_1 = \alpha_2,$$
$$\vartheta_2 = \vartheta_1 + 180,$$

welches die beiden Gesetze der Spiegelung eines Strahls sind.

Nachdem der aufgestellte Lehrsatz für eine brechende Fläche erwiesen ist, läßt er sich leicht auf beliebig viele ausdehnen. Wenn ein Lichtstrahl durch eine beliebige Anzahl von brechenden Mitteln hindurch-

gegangen ist, welche durch Flächen von kontinuierlicher Krümmung begrenzt sind, so läßt sich sein Weg durch die Bedingung bestimmen, daß die optische Länge des Strahls zwischen einem seiner Punkte im ersten und einem im letzten Mittel ein Grenzwert (Maximum oder Minimum) ist.

Es sei $\Psi$ die optische Länge des Strahls, und es seien die Punkte der ersten brechenden Fläche durch die Koordinaten $x_1$ und $y_1$, die der zweiten durch $x_2$ und $y_2$, die der $m^{\text{ten}}$ durch $x_m$ und $y_m$ gegeben, und alle diese Koordinatensysteme mögen so gelegt sein, daß ihre $z$-Achse mit dem Einfallslot zusammenfällt, die $xy$-Ebene die brechende Fläche tangiert. Es sind die ersten Bedingungen des Grenzwertes

$$\frac{d\Psi}{dx_1} = 0, \qquad \frac{d\Psi}{dy_1} = 0,$$
$$\frac{d\Psi}{dx_2} = 0, \qquad \frac{d\Psi}{dy_2} = 0$$
$$\text{usw.}$$
$$\frac{d\Psi}{dx_m} = 0, \qquad \frac{d\Psi}{dy_m} = 0.$$

Die erste dieser Gleichungen ist nach dem eben bewiesenen Lehrsatze identisch mit der Bedingung, daß der Strahl an der ersten Fläche nach dem bekannten Brechungsgesetze gebrochen werde; die zweite sagt dasselbe für die zweite Fläche, die $m^{\text{te}}$ für die $m^{\text{te}}$. Also ist der Weg des Strahls durch die aufgestellte Bedingung genau ebenso bestimmt, wie durch das Brechungsgesetz.

Auch in diesem Falle genügt die Untersuchung der ersten Differentialquotienten der optischen Länge. Ob der Weg des Strahls für alle Verschiebungen der Einfallspunkte ein Maximum, oder für alle ein Minimum, oder für einige ein Maximum, für andere ein Minimum usw. ist, hängt bekanntlich von den zweiten Differentialquotienten ab, kommt aber hier zunächst nicht in Betracht, und es mag deshalb in der vorliegenden Untersuchung erlaubt sein, Grenzwerte im allgemeinen alle die Werte der optischen Länge des Strahls zu nennen, deren erste Differentialquotienten den für das Maximum und Minimum aufzustellenden Bedingungen entsprechen, ohne daß weiter nach dem Vorzeichen und der Größe der zweiten Differentialquotienten gefragt wird. Welchen Einfluß bei unserer Untersuchung die zweiten Differentialquotienten haben, wird sich später zeigen.

II. Wenn Lichtstrahlen von einem Punkte ausgegangen und durch beliebig viele Flächen von kontinuierlicher Krümmung gebrochen worden sind, stehen sie nach der letzten Brechung senkrecht auf jeder krummen Fläche, für deren sämtliche Punkte die optische Länge des Strahls einen konstanten Wert hat.

Die Bezeichnung bleibe dieselbe, wie bei der Verallgemeinerung des Satzes I. Der Endpunkt des Strahls liege in einer krummen Fläche, für welche

$$\Psi = \text{const.} \quad \ldots \quad 1)$$

Wir wollen die einzelnen Punkte dieser Fläche durch dasselbe Koordinatensystem bestimmen, durch welches die Punkte der letzten brechenden Fläche bestimmt sind, und für die Punkte der Fläche $\Psi = C$ setzen $x_m = a$, $y_m = b$, $z_m = c$, und $c$ als Funktion von $a$ und $b$ ansehen.

Wir wollen nun zwei gebrochene Strahlen betrachten, welche unendlich wenig voneinander entfernt sind. Es seien die Koordinaten der Punkte, wo der erste die betreffenden Flächen trifft

$$x_1,\ y_1,\ x_2,\ y_2 \text{ usw. } x_m,\ y_m,\ a,\ b,\ c,$$

die des zweiten

$$x_1 + \Delta x_1,\ y_1 + \Delta y_1,\ x_2 + \Delta x_2,\ y_2 + \Delta y_2 \text{ usw.}$$
$$x_m + \Delta x_m,\ y_m + \Delta y_m,\ a + \Delta a,\ b + \Delta b,\ c + \Delta c,$$

wobei wir zu setzen haben, weil $c$ eine Funktion von $a$ und $b$ ist,

$$\Delta c = \frac{dc}{da}\Delta a + \frac{dc}{db}\Delta b.$$

Die optische Länge des ersten Strahls sei $\Psi$, die des zweiten $\Psi + \Delta\Psi$, so ist für unendlich kleine Werte der Änderungen

$$\Psi + \Delta\Psi = \Psi + \frac{d\Psi}{dx_1}\Delta x_1 + \frac{d\Psi}{dx_2}\Delta x_2 \text{ usw. } + \frac{d\Psi}{dx_m}\Delta x_m + \left(\frac{d\Psi}{da} + \frac{d\Psi}{dc}\cdot\frac{dc}{da}\right)\Delta a$$
$$+ \frac{d\Psi}{dy_1}\Delta y_1 + \frac{d\Psi}{dy_2}\Delta y_2 \text{ usw. } + \frac{d\Psi}{dy_m}\Delta y_m + \left(\frac{d\Psi}{db} + \frac{d\Psi}{dc}\cdot\frac{dc}{db}\right)\Delta b.$$

Da nun der Wert von $\Psi$ in der Fläche, deren Punkte durch die Koordinaten $a$, $b$ und $c$ gegeben sind, konstant sein soll, so folgt, daß

$$\Delta\Psi = 0$$

und da ferner nach dem vorigen Lehrsatze

$$0 = \frac{d\Psi}{dx_1} = \frac{d\Psi}{dy_1} = \frac{d\Psi}{dx_2} = \frac{d\Psi}{dy_2} \text{ usw.,}$$

so folgt

$$\left(\frac{d\Psi}{da} + \frac{d\Psi}{dc}\cdot\frac{dc}{da}\right)\Delta a + \left(\frac{d\Psi}{db} + \frac{d\Psi}{dc}\cdot\frac{dc}{db}\right)\Delta b = 0,$$

welche Gleichung für alle beliebigen Werte von $\frac{\Delta a}{\Delta b}$ gültig sein muß, woraus folgt, daß einzeln:

$$\left.\begin{aligned}\frac{d\Psi}{da} + \frac{d\Psi}{dc}\cdot\frac{dc}{da} &= 0\\ \frac{d\Psi}{db} + \frac{d\Psi}{dc}\cdot\frac{dc}{db} &= 0\end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 2).$$

Nennen wir nun $r_0$, $r_1$ usw. $r_m$ die Weglängen des Strahls in den verschiedenen brechenden Medien, $n_0$, $n_1$ usw. $n_m$ die Brechungsverhältnisse, so ist

$$\Psi = n_0 r_0 + n_1 r_1 + \text{ usw. } + n_m r_m.$$

Hierin ist nur $r_m$ abhängig von $a$, $b$ und $c$, folglich

$$\frac{d\Psi}{da} = n_m\frac{dr_m}{da} = n_m\frac{a - x_m}{r_m}$$
$$\frac{d\Psi}{db} = n_m\frac{dr_m}{db} = n_m\frac{b - y_m}{r_m}$$

$$\frac{d\Psi}{dc} = n_m \frac{dr_m}{dc} = n_m \frac{c - z_m}{r_m},$$

so verwandeln sich endlich die Gleichungen 2) in

$$\left.\begin{aligned}(a - x_m) + (c - z_m)\frac{dc}{da} &= 0\\ (b - y_m) + (c - z_m)\frac{dc}{db} &= 0\end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 2\text{a}),$$

welche bedeuten, daß $a$, $b$, $c$ der Fußpunkt einer vom Punkte $x_m$, $y_m$, $z_m$ auf die Fläche $\Psi = C$ gefällten Normale ist.

Daß dies so sei, ergibt sich am einfachsten, wenn man bedenkt, daß die Normale selbst ein Maximum oder Minimum der Entfernung zwischen dem Punkte, von dem man sie fällt, und der krummen Fläche ist. Es ist aber die Entfernung $r_m$ zwischen dem Punkte $x_m$, $y_m$, $z_m$ und dem Punkte $a$, $b$, $c$ der Fläche

$$r_m = \sqrt{(x_m - a)^2 + (y_m - b)^2 + (z_m - c)^2};$$

um sie zu einem Maximum oder Minimum zu machen, muß man setzen

$$0 = \frac{dr_m}{da} + \frac{dr_m}{dc}\frac{dc}{da} = \frac{a - x_m}{r_m} + \frac{dc}{da}\cdot\frac{c - z_m}{r_m},$$

$$0 = \frac{dr_m}{db} + \frac{dr_m}{dc}\frac{dc}{da} = \frac{b - y_m}{r_m} + \frac{dc}{db}\cdot\frac{c - z_m}{r_m},$$

welche mit den Gleichungen 2a) identisch sind.

Der durch den Punkt $a$, $b$, $c$ gehende Strahl ist also eine Normale auf der durch denselben Punkt gehenden Fläche $\Psi = C$.

Da das Licht gleiche optische Längen in gleicher Zeit zurücklegt, so gelangt es auch in gleicher Zeit von dem leuchtenden Punkte zu allen Punkten der Fläche $\Psi = C$, und diese ist daher eine Wellenfläche, d. h. sie geht durch alle diejenigen Punkte, in denen die gleiche Phase der Ätherschwingung stattfindet.

Bestimmung des Verlaufs eines unendlich dünnen Strahlenbündels. Nachdem bewiesen worden ist, daß es eine krumme Fläche gibt, die Wellenfläche, auf welcher alle durch Brechung in beliebigen Flächen von kontinuierlicher Krümmung aus homozentrischem Licht entstandenen Strahlen senkrecht stehen, folgt auch, daß für die gebrochenen Lichtstrahlen die Sätze gelten, welche für die Normalen krummer Flächen bekannt sind. Denken wir uns also durch einen beliebig gewählten Strahl $A$ eine Ebene gelegt, welche die Wellenfläche in einer Kurve schneidet, und die Ebene um den Strahl gedreht, so wird die Schnittlinie im allgemeinen, da wo sie den Strahl $A$ schneidet, verschiedene Krümmung zeigen, und zwar wird die Ebene der größten Krümmung der Schnittlinie senkrecht stehen auf der Ebene ihrer kleinsten Krümmung. Errichtet man nun in den Punkten der Wellenfläche, welche dem Strahle $A$ unendlich nahe sind, Normalen, welche also benachbarten Strahlen entsprechen, so schneiden diejenigen, deren Fußpunkte in der Linie größter oder kleinster Krümmung liegen, den Strahl $A$ in dem Mittelpunkte bezüglich des größten oder kleinsten Krümmungskreises, die dagegen, deren Fußpunkte weder in der Linie größter noch kleinster Krümmung liegen, schneiden

den Strahl $A$ gar nicht. Auf jedem Strahle gibt es also im allgemeinen zwei Brennpunkte, in denen er von benachbarten Strahlen geschnitten wird, welche den Mittelpunkten der größten und kleinsten Krümmung der Wellenfläche im Fußpunkte des Strahls entsprechen. Nur wenn beide Punkte in einen zusammenrücken, d. h. die Krümmung der Wellenfläche im Fußpunkte des Strahls nach allen Richtungen hin gleich groß wird, wird der Strahl $A$ von allen ihm unendlich nahen Strahlen in einem Punkte geschnitten.

Um diese Sätze analytisch darzustellen, wollen wir ein Koordinatensystem benutzen, dessen $z$-Achse mit dem Strahle $A$ zusammenfällt. Für die einzelnen Punkte der Wellenfläche setzen wir

$$x = a, \quad y = b, \quad z = c.$$

Die Fläche sei gegeben dadurch, daß $c$ als Funktion von $a$ und $b$ gegeben ist. Nach der Annahme über die Lage des Koordinatensystems ist für

$$a = b = 0 \text{ auch } \frac{dc}{da} = \frac{dc}{db} = 0 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1).$$

Wenn $x$, $y$, $z$ die Koordinaten eines Punktes der in $a$, $b$, $c$ auf der Wellenfläche errichteten Normale bezeichnen, haben wir, wie in Lehrsatz II Gleichung 2a):

$$\left.\begin{aligned} (a - x) + (c - z)\frac{dc}{da} &= 0 \\ (b - y) + (c - z)\frac{dc}{db} &= 0 \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1\,a).$$

Setzt man für $a$ und $b$ die unendlich wenig davon verschiedenen Größen $a + \Delta a$, $b + \Delta b$, so werden die Gleichungen 1a)

$$\begin{aligned} (a + \Delta a - x) &+ \left(c + \frac{dc}{da}\Delta a + \frac{dc}{db}\Delta b - z\right)\frac{dc}{da} \\ &+ (c - z)\left(\frac{d^2c}{da^2}\Delta a + \frac{d^2c}{da\,db}\Delta b\right) = 0, \\ (b + \Delta b - y) &+ \left(c + \frac{dc}{da}\Delta a + \frac{dc}{db}\Delta b - z\right)\frac{dc}{db} \\ &+ (c - z)\left(\frac{d^2c}{da\cdot db}\Delta a + \frac{d^2c}{db^2}\Delta b\right) = 0. \end{aligned}$$

Setzen wir hierin $a = b = 0$ und nach 1) auch $\frac{dc}{da} = \frac{dc}{db} = 0$, so erhalten wir die Gleichungen einer Normale, die dem Strahle $A$ unendlich nahe die Wellenfläche in dem durch die Koordinaten $\Delta a$ und $\Delta b$ gegebenen Punkte schneidet, nämlich

$$\left.\begin{aligned} \Delta a - x + (c - z)\left(\frac{d^2c}{da^2}\Delta a + \frac{d^2c}{da\cdot db}\Delta b\right) &= 0 \\ \Delta b - y + (c - z)\left(\frac{d^2c}{da\cdot db}\Delta a + \frac{d^2c}{db^2}\Delta b\right) &= 0 \end{aligned}\right\} \quad \ldots \quad 2).$$

Für alle Punkte des Strahls $A$ ist gleichzeitig $x = y = 0$. Soll $A$ also von dem Strahle geschnitten werden, dessen Weg durch die Gleichungen 2) gegeben ist,

so muß auch in diesen für irgend einen Wert von $z$ gleichzeitig $x = y = 0$ werden. Setzen wir nun in ihnen $x = y = 0$ und eliminieren $z$, so bleibt als Bedingung für die Möglichkeit des Schneidens:

$$\frac{d^2c}{da \cdot db} \Delta a^2 + \left( \frac{d^2c}{db^2} - \frac{d^2c}{da^2} \right) \Delta a \, \Delta b - \frac{d^2c}{da \cdot db} \Delta b^2 = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3).$$

Nennen wir die unendlich kleine Entfernung der Fußpunkte der beiden Normalen $r$ und den Winkel, den sie mit der $x$-Achse macht, $\alpha$, welches also zwischen Null und $\pi$ liegen muß, so ist

$$\Delta a = r \cos \alpha, \qquad \Delta b = r \sin \alpha.$$

Setzen wir außerdem

$$2n = \frac{\frac{d^2c}{db^2} - \frac{d^2c}{da^2}}{\frac{d^2c}{da \cdot db}},$$

so wird die Gleichung 3), vorausgesetzt, daß $\frac{d^2c}{da \cdot db}$ nicht gleich Null ist,

$$\operatorname{tang}^2 \alpha - 2n \operatorname{tang} \alpha = 1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3\text{a}),$$

also

$$\operatorname{tang} \alpha = n \pm \sqrt{1 + n^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3\text{b}).$$

Die beiden Werte von $\operatorname{tang} \alpha$, welche jedenfalls reell sind, kann man auch schreiben

$$n + \sqrt{1 + n^2} \quad \text{und} \quad - \frac{1}{n + \sqrt{1 + n^2}}.$$

Wenn also $\alpha_0$ der eine entsprechende Wert von $\alpha$ ist, ist $\alpha_0 + \frac{\pi}{2}$ oder $\alpha_0 - \frac{\pi}{2}$ der andere. Die beiden Winkel sind um einen Rechten unterschieden. Die Größe $r$, die den Abstand der Normalen in der Wellenfläche bezeichnet, verschwindet aus der Gleichung 3a). Es wird also der Strahl $A$ geschnitten von allen unendlich nahen Strahlen, welche in Ebenen liegen, die mit der $x$-Achse den Winkel $\alpha_0$ und $\alpha_0 + \frac{\pi}{2}$ bilden.

Bisher war die Lage der $x$- und $y$-Achse willkürlich in der auf den Strahl $A$ senkrechten Ebene. Zur Vereinfachung wollen wir sie jetzt so gelegt denken, daß sie mit den Ebenen der schneidenden Strahlen zusammenfallen, was jedenfalls ausführbar sein muß. Es müssen dann die beiden Werte von $\operatorname{tang} \alpha$ werden 0 und $\infty$, dies bedingt, daß

$$n = \pm \infty$$

und

$$\frac{d^2c}{da \cdot db} = 0.$$

In der Tat, wenn wir die letztere Bedingung erfüllt denken, reduziert sich die Bedingung des Schneidens, Gleichung 3) auf

$$\left( \frac{d^2c}{db^2} - \frac{d^2c}{da^2} \right) \Delta a \, \Delta b = 0,$$

welche erfüllt wird durch die Annahme, daß entweder $\Delta a = 0$ oder $\Delta b = 0$, daß also die schneidenden Normalen entweder in der $yz$-Ebene oder in der $xz$-Ebene liegen. Ist endlich gleichzeitig auch noch

$$\frac{d^2c}{db^2} - \frac{d^2c}{da^2} = 0,$$

so ist die Bedingung des Schneidens für alle beliebigen unendlich kleinen Werte von $\Delta a$ und $\Delta b$ erfüllt, es schneiden also alle unendlich nahen Normalen den Strahl $A$. Indem wir weiter die Annahme $\frac{d^2c}{da\,db} = 0$ festhalten, und dann entweder $\Delta a = 0$ oder $\Delta b = 0$ setzen, finden wir, wie oben bemerkt wurde, die Entfernung $z$, in der die benachbarten Strahlen den der $z$-Achse parallelen Strahl schneiden, indem wir in den Gleichungen 2) $x = y = 0$ setzen.

Für die Strahlen in der $xz$-Ebene ist $\Delta b = 0$, und es folgt aus der ersten der Gleichungen 2) für $z - c$ die Entfernung des Schneidepunkts von der Wellenfläche:

$$z - c = \frac{1}{\frac{d^2c}{da^2}}.$$

Die zweite Gleichung wird $0 = 0$. Für die Strahlen in der $yz$-Ebene ist $\Delta a = 0$ und

$$z - c = \frac{1}{\frac{d^2c}{db^2}}.$$

Wenn endlich $\frac{d^2c}{da^2} = \frac{d^2c}{db^2} = \frac{1}{\varrho}$, so ist für alle benachbarte Strahlen ohne Unterschied

$$z - c = \varrho.$$

Übrigens sind in diesem Falle die $xz$- und $yz$-Ebene auch die Ebenen größter und kleinster Krümmung, und die Werte der entsprechenden Krümmungsradien $\varrho_a$ und $\varrho_b$ sind

$$\varrho_a = \frac{1}{\frac{d^2c}{da^2}}, \qquad \varrho_b = \frac{1}{\frac{d^2c}{db^2}},$$

so daß also die Brennpunkte auch mit den Krümmungsmittelpunkten der Wellenfläche zusammenfallen.

Form eines unendlich dünnen kreisförmigen Strahlenbündels. Um eine deutlichere Vorstellung von dem Verlauf der Strahlen in einem unendlich dünnen Bündel zu erhalten, wollen wir die Form eines Strahlenbündels betrachten, dessen Basis in der Wellenfläche eine Kreislinie ist. Wir setzen also in den Gleichungen 2) wie vorher

$$\frac{d^2c}{da \cdot db} = 0 \text{ und } \Delta a = r\cos\alpha,\ \Delta b = r\sin\alpha$$

und erhalten aus den Gleichungen 2)

$$r\cos\alpha - x + (c - z)\frac{d^2c}{da^2} r\cos\alpha = 0,$$

$$r \sin \alpha - y + (c - z)\frac{d^2 c}{d b^2} r \sin \alpha = 0 .$$

Um die Schnittlinie der Oberfläche des Bündels mit einer auf der Achse des Bündels senkrechten Ebene zu erhalten, müssen wir $z$ konstant setzen und den Winkel $\alpha$ eliminieren. Setzen wir zur Abkürzung

$$p = + r\left[1 + (c - z)\frac{d^2 c}{d a^2}\right] = + \frac{r}{\varrho_a}[\varrho_a + c - z],$$

$$q = + r\left[1 + (c - z)\frac{d^2 c}{d b^2}\right] = + \frac{r}{\varrho_b}[\varrho_b + c - z],$$

so erhalten wir

$$\frac{x^2}{p^2} + \frac{y^2}{q^2} = 1 .$$

Dies ist die Gleichung einer Ellipse, deren Achsen von der Länge $2p$ und $2q$ den Achsen der $x$ und $y$ parallel liegen. Beide Achsen der Ellipse sind kleiner, wenn $r$ kleiner ist; füllt das Strahlenbündel also in der ersten Wellenfläche nicht bloß eine Kreislinie, sondern eine Kreisfläche an, so bleiben sämtliche Strahlen doch innerhalb des Raums, den die äußeren Strahlen begrenzen, eingeschlossen, und die letzteren bestimmen mithin die Gestalt des Bündels. In der Wellenfläche, von der wir ausgingen, selbst ist $c - z = 0$, also die Achsen $p = q = r$, der Querschnitt ein Kreis. Die Achse $p$ wird gleich Null, wenn

$$z - c = \frac{1}{\frac{d^2 c}{d a^2}} = \varrho_a ,$$

wenn also der Querschnitt des Bündels durch die Brennpunkte der Strahlen in der $xz$-Ebene gelegt wird. Ebenda ist die andere Halbachse

$$q = \pm \frac{r}{\varrho_b}(\varrho_a + \varrho_b) .$$

Der Querschnitt des Bündels ist alsdann eine der $y$-Achse parallele gerade Linie, deren Länge gleich dem eben angegebenen Werte von $q$ ist.

Dagegen wird der Querschnitt des Bündels eine der $x$-Achse parallele gerade Linie, wenn

$$z - c = \frac{1}{\frac{d^2 c}{d b^2}} = \varrho_b ,$$

$$q = 0 , \qquad p = \pm \frac{r}{\varrho_a}(\varrho_a + \varrho_b) .$$

Endlich gibt es noch eine zweite Stelle, wo der Querschnitt des Strahlenbündels ein Kreis ist, wo nämlich

$$p = - q ,$$

$$1 + \frac{c - z}{\varrho_a} = - 1 - \frac{c - z}{\varrho_b} ,$$

$$z - c = \frac{2 \varrho_a \varrho_b}{\varrho_a + \varrho_b} ,$$

daselbst wird

$$p = q = \pm r \cdot \frac{\varrho_a - \varrho_b}{\varrho_a + \varrho_b} .$$

Zwischen den beiden kreisförmigen Querschnitten des Bündels muß einer der linienförmigen Querschnitte liegen. Dieser Linie sind die größeren Achsen der elliptischen Querschnitte parallel, welche zwischen den beiden kreisförmigen angelegt werden, während die großen Achsen der außerhalb dieses Zwischenraums liegenden senkrecht dagegen gestellt sind. In Fig. 10 bezeichnet die Linie $cd$ den mittleren Strahl, in $c$ ist ein kreisförmiges Diaphragma angenommen, in $a$ und $b$ die Brennpunkte. Unter der Linie sind die Querschnitte des Bündels, welche den darüber liegenden Punkten der Linie entsprechen, abgebildet.

## Allgemeine analytische Bedingung für die Lage der Brennpunkte.

Wir wollen die optische Länge zweier unendlich naher Strahlen $A$ und $B$ von ihrem gemeinsamen Ausgangspunkte an bis zu einem Brennpunkte hin, wo sie nach beliebig vielen Brechungen an beliebigen brechenden Flächen von kontinuierlicher Krümmung wieder zusammentreffen, $\Psi$ und $\Psi + \Delta\Psi$ nennen. Die Koordinatensysteme, nach denen wir die Punkte in den einzelnen brechenden Flächen bestimmen, werden wieder so gedacht, daß ihre $z$-Achse mit den dem

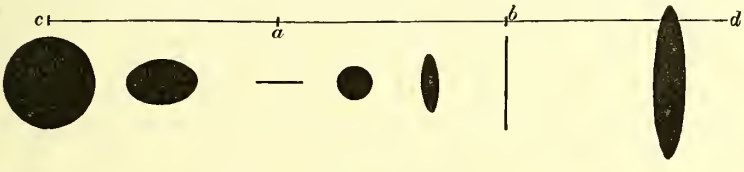



Fig. 10.

Strahle $A$ angehörigen Einfallsloten zusammenfällt, und ihre $xy$-Ebene die brechende Fläche tangiert. Die Koordinaten der Einfallspunkte des Strahls $B$ seien in der ersten Fläche $x_1$, $y_1$, $z_1$, in der zweiten $x_2$, $y_2$, $z_2$ usw., in der $m$ten $x_m$, $y_m$, $z_m$. Es wird indessen im folgenden vorausgesetzt, daß die optischen Längen ausgedrückt sind als Funktion der $x$ und $y$ allein, und die $z$, welche selbst wieder Funktionen von $x$ und $y$ sind, aus diesen Werten eliminiert sind; da übrigens die Strahlen $A$ und $B$ unendlich nahe sein sollen, werden die Größen $x_1$, $y_1$ bis $x_m$, $y_m$ als unendlich klein betrachtet.

Nach dem Taylorschen Satze ist alsdann

$$\Psi + \Delta\Psi = \Psi + \frac{d\Psi}{dx_1}x_1 + \frac{d\Psi}{dx_2}x_2 + \text{ usw. } + \frac{d\Psi}{dx_m}x_m + \frac{d\Psi}{dy_1}y_1 + \frac{d\Psi}{dy_2}y_2 + \text{ usw. } + \frac{d\Psi}{dy_m}y_m .$$

Es müssen nun beide Strahlen den im ersten Lehrsatze ausgesprochenen Bedingungen genügen, d. h. die ersten Differentialquotienten von $\Psi$ und von $\Psi + \Delta\Psi$ nach $x_1$, $y_1$, $x_2$, $y_2$ usw. $x_m$, $y_m$ genommen müssen gleich Null sein. Dies gibt für den ersten Strahl

$$\frac{d\Psi}{dx_1} = 0 , \qquad \frac{d\Psi}{dx_2} = 0 \text{ usw. } \frac{d\Psi}{dx_m} = 0 ,$$
$$\frac{d\Psi}{dy_1} = 0 , \qquad \frac{d\Psi}{dy_2} = 0 \text{ usw. } \frac{d\Psi}{dy_m} = 0$$

und mit Berücksichtigung dieser Gleichungen für den zweiten Strahl folgendes System von Gleichungen

$$\left.\begin{array}{l}
\frac{d^2\Psi}{dx_1^2}x_1 + \frac{d^2\Psi}{dx_1\,dy_1}y_1 + \text{usw.} + \frac{d^2\Psi}{dx_1\,dx_m}x_m + \frac{d^2\Psi}{dx_1\,dy_m}y_m = 0 \\
\frac{d^2\Psi}{dy_1\,dx_1}x_1 + \frac{d^2\Psi}{dy_1^2}y_1 + \text{usw.} + \frac{d^2\Psi}{dy_1\,dx_m}x_m + \frac{d^2\Psi}{dy_1\,dy_m}y_m = 0 \\
\qquad\qquad\qquad\qquad \text{usw.} \\
\frac{d^2\Psi}{dx_m\,dx_1}x_1 + \frac{d^2\Psi}{dx_m\,dy_1}y_1 + \text{usw.} + \frac{d^2\Psi}{dx_m^2}x_m + \frac{d^2\Psi}{dx_m\,dy_m}y_m = 0 \\
\frac{d^2\Psi}{dy_m\,dx_1}x_1 + \frac{d^2\Psi}{dy_m\,dy_1}y_1 + \text{usw.} + \frac{d^2\Psi}{dy_m\,dx_m}x_m + \frac{d^2\Psi}{dy_m^2}y_m = 0
\end{array}\right\} \quad . \; . \quad 4).$$

Die Anzahl der Glieder in diesen Gleichungen vermindert sich übrigens dadurch beträchtlich, daß $\frac{d^2\Psi}{dx_f\,dx_g}$ und $\frac{d^2\Psi}{dx_f\,dy_g}$ und $\frac{d^2\Psi}{dy_f\,dy_g}$ gleich Null werden, so oft die Indizes $f$ und $g$ um mehr als Eins verschieden sind.

Die Zahl unserer Gleichungen ist $2m$ und sie enthalten $2m$ Unbekannte $x_1$, $y_1$ bis $x_m$, $y_m$. Da indessen nicht alle diese Unbekannten gleich Null werden dürfen (der Strahl $B$ soll ja von $A$ unterschieden sein), so kann man alle Gleichungen durch eine der Unbekannten $x_l$, welche nicht Null wird, dividieren, und die $(2m-1)$ anderen Unbekannten dividiert durch $x_l$ als neue Unbekannte betrachten. Dann hat man $2m$ Gleichungen mit $2m-1$ Unbekannten, so daß, wenn man die letzteren eliminiert, noch eine Gleichung übrig bleibt, in welcher die Größen $x_1$, $y_1$ bis $x_m$, $y_m$ nicht mehr vorkommen, sondern nur noch die partiellen zweiten Differentialquotienten von $\Psi$. Diese letzte Eliminationsgleichung, in welcher die Determinante der Gleichungen 4) gleich Null gesetzt wird, ist die gesuchte Gleichung für die Lage der Brennpunkte.

Die Determinante der Gleichungen 4) ist nach bekannten Regeln[1] leicht zu bilden. Sie ist eine Summe von Gliedern, deren erstes das Produkt:

$$\frac{d^2\Psi}{dx_1\cdot dx_1}\cdot\frac{d^2\Psi}{dy_1\,dy_1}\cdot\frac{d^2\Psi}{dx_2\cdot dx_2}\quad\text{usw.}\quad\frac{d^2\Psi}{dx_m\cdot dx_m}\cdot\frac{d^2\Psi}{dy_m\cdot dy_m}.$$

Die übrigen Glieder der Summe erhält man, indem man in den Nennern der Differentialquotienten, welche Produkte je zweier Faktoren sind, alle ersten Faktoren unverändert läßt, mit den zweiten aber alle möglichen Variationen bildet, und so oft man dabei zwei dieser Faktoren miteinander vertauscht, auch das Vorzeichen des Gliedes wechseln läßt.

Nach der Bezeichnungsweise der Variationsrechnung ausgedrückt, wird also die Lage eines Strahls gefunden zwischen seinem Anfangs- und Endpunkt durch die Bedingung, daß die erste Variation seiner optischen Länge gleich Null sei. Und sein Anfangs- und Endpunkt sind zusammengehörige Brennpunkte, wenn die zweite Variation der optischen Länge auch gleich Null gemacht werden kann. Im letzteren Falle ist diese Länge nicht notwendig ein Maximum oder Minimum.

### Brechung im Prisma.

Wir denken die Lage des leuchtenden Punktes durch drei rechtwinklige Koordinaten $a$, $b$, $c$ gegeben, so daß die Achse der $c$ mit der brechenden Kante, die Ebene der $bc$ mit der ersten brechenden Fläche zusammenfällt, und die

[1] S. Jacobi in Crelles Journ. für Math. XXII.

positiven $a$ außerhalb des Prisma liegen. Für den Einfallspunkt des Strahls auf dieser Fläche sei $a = 0$, $b = y$, $c = z$. Ebenso denken wir einen Punkt des aus dem Prisma getretenen Strahls durch drei rechtwinklige Koordinaten $\alpha$, $\beta$, $\gamma$ gegeben, die einem zweiten Systeme angehören, dessen $\gamma$-Achse wieder mit der brechenden Kante, dessen $\beta\gamma$-Ebene aber mit der zweiten brechenden Fläche zusammenfällt, und dessen positive $\alpha$ ebenfalls außerhalb des Prisma liegen. Die $\gamma$ sollen von demselben Punkte der Kante ab gemessen werden wie die $c$, so daß also die $ab$-Fläche des ersten Systems mit der $\alpha\beta$-Fläche des zweiten identisch ist. Für den Austrittspunkt des Strahls aus dem Prisma sei $\alpha = 0$, $\beta = v$, $\gamma = \zeta$. Der brechende Winkel des Prisma sei $\varphi$, das Brechungsverhältnis der Substanz des Prisma gegen das äußere Medium sei $n$. Die Länge des Strahls vor dem Prisma sei $r_0$, die im Prisma $r_1$, hinter dem Prisma $r_2$, die optische Länge des ganzen Strahls $\Psi$, so ist

$$\left.\begin{aligned} r_0 &= \sqrt{a^2 + (b-y)^2 + (c-z)^2} \\ r_1 &= \sqrt{y^2 - 2yv\cos\varphi + v^2 + (z-\zeta)^2} \\ r_2 &= \sqrt{\alpha^2 + (\beta - v)^2 + (\gamma - \zeta)^2} \\ \Psi &= r_0 + n r_1 + r_2 \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad 5).$$

Wenn wir die Koordinaten des ersten Systems in denen des zweiten ausdrücken, so ist

$$\left.\begin{aligned} \alpha &= -a\cos\varphi - b\sin\varphi \\ \beta &= -a\sin\varphi + b\cos\varphi \\ \gamma &= c \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 5\text{a}).$$

Nach Lehrsatz I sind für den Strahl, wenn er nach dem Brechungsgesetze gebrochen sein soll, folgende Bedingungen zu erfüllen:

$$\left.\begin{aligned} 0 &= \frac{d\Psi}{dy} = \frac{y-b}{r_0} + n\frac{y - v\cos\varphi}{r_1} \\ 0 &= \frac{d\Psi}{dv} = \frac{v-\beta}{r_2} + n\frac{v - y\cos\varphi}{r_1} \\ 0 &= \frac{d\Psi}{dz} = \frac{z-c}{r_0} + n\frac{z-\zeta}{r_1} \\ 0 &= \frac{d\Psi}{d\zeta} = \frac{\zeta-\gamma}{r_2} + n\frac{\zeta - z}{r_1} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad 6).$$

Wenden wir folgende Bezeichnung an

$$\left.\begin{aligned} \frac{b-y}{nr_0} &= \frac{y - v\cos\varphi}{r_1} = \cos m \\ \frac{\beta - v}{nr_2} &= \frac{v - y\cos\varphi}{r_1} = \cos\mu \\ \frac{c-z}{nr_0} &= \frac{\zeta-\gamma}{nr_2} = \frac{z-\zeta}{r_1} = \cos\nu \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 6\text{a}),$$

wobei sich ergibt

$$\sin^2\varphi\sin^2\nu = \cos^2 m + 2\cos m\cos\mu\cos\varphi + \cos^2\mu \quad \ldots\ldots \quad 6\text{b}),$$

und bilden wir mit Benutzung dieser Bezeichnung die zweiten Differentialquotienten von $\Psi$, so wird das System der Gleichungen 4), welche die Lage der Brennpunkte und die Verhältnisse der unendlich kleinen Differenzen $\Delta y$, $\Delta z$, $\Delta v$, $\Delta \zeta$ beziehlich der Koordinaten $y$, $z$, $v$ und $\zeta$ je zweier benachbarter und sich in konjugierten Brennpunkten schneidender Strahlen ergeben, folgendes:

$$\left.\begin{aligned}&\left[\frac{1}{r_0}(1-n^2\cos^2 m)+\frac{n}{r_1}\sin^2 m\right]\Delta y-\left(\frac{n^2}{r_0}+\frac{n}{r_1}\right)\cos m\cos\nu\,\Delta z\\&\qquad-\frac{n}{r_1}(\cos\varphi+\cos m\cos\mu)\,\Delta v+\frac{n}{r_1}\cos m\cos\nu\,\Delta\zeta=0\end{aligned}\right\}\ 7\,a)$$

$$\left.\begin{aligned}&-\left(\frac{n^2}{r_0}+\frac{n}{r_1}\right)\cos m\cos\nu\,\Delta y+\left[\frac{1}{r_0}(1-n^2\cos^2\nu)+\frac{n}{r_1}\sin^2\nu\right]\Delta z\\&\qquad-\frac{n}{r_1}\cos\mu\cos\nu\,\Delta v-\frac{n}{r_1}\sin^2\nu\,\Delta\zeta=0\end{aligned}\right\}\ 7\,b)$$

$$\left.\begin{aligned}&-\frac{n}{r_1}(\cos\varphi+\cos m\cos\mu)\,\Delta y-\frac{n}{r_1}\cos\mu\cos\nu\,\Delta z\\&+\left[\frac{1}{r_2}(1-n^2\cos^2\mu)+\frac{n}{r_1}\sin^2\mu\right]\Delta v+\left(\frac{n^2}{r_2}+\frac{n}{r_1}\right)\cos\mu\cos\nu\,\Delta\zeta=0\end{aligned}\right\}\ 7\,c)$$

$$\left.\begin{aligned}&\frac{n}{r_1}\cos m\cos\nu\,\Delta y-\frac{n}{r_1}\sin^2\nu\,\Delta z\\&+\left(\frac{n^2}{r_2}+\frac{n}{r_1}\right)\cos\mu\cos\nu\,\Delta v+\left[\frac{1}{r_2}(1-n^2\cos^2\nu)+\frac{n}{r_1}\sin^2\nu\right]\Delta\zeta=0\end{aligned}\right\}\ 7\,d).$$

Im allgemeinen werden wir $r_1$ die Länge des Wegs, den die Strahlen im Prisma zurücklegen, vernachlässigen können gegen die Wege außerhalb des Prisma $r_0$ und $r_2$. Multiplizieren wir die vier Gleichungen mit $r_1$ und vernachlässigen dann die mit $\frac{r_1}{r_0}$ oder $\frac{r_1}{r_2}$ multiplizierten Glieder als unendlich klein, so erhalten wir folgende drei Gleichungen [7 b) und 7 d) geben zwei identische Gleichungen]

$$\left.\begin{aligned}&\sin^2 m\,\Delta y-(\cos\varphi+\cos m\cos\mu)\,\Delta v-\cos m\cos\nu\,(\Delta z-\Delta\zeta)=0\\&-\cos m\cos\nu\,\Delta y-\cos\mu\cos\nu\,\Delta v+\sin^2\nu\,(\Delta z-\Delta\zeta)\qquad=0\\&-(\cos\varphi+\cos m\cos\mu)\,\Delta y+\sin^2\mu\,\Delta v-\cos\mu\cos\nu\,(\Delta z-\Delta\zeta)=0\end{aligned}\right\}\ 8).$$

Von diesen drei Gleichungen folgt aber wieder eine aus den beiden andern, so daß sie sich nach Elimination von $(\Delta z-\Delta\zeta)$ oder von $\Delta v$ reduzieren auf folgende beide:

$$\left.\begin{aligned}&(\cos\mu+\cos m\cos\varphi)\,\Delta y=(\cos m+\cos\mu\cos\varphi)\,\Delta v\\\text{oder}\qquad&\frac{\Delta y}{y}=\frac{\Delta v}{v}\end{aligned}\right\}\ \ldots\ 8\,a)$$

und

$$\left.\begin{aligned}&(\Delta z-\Delta\zeta)(\cos m+\cos\mu\cos\varphi)=\cos\nu\sin^2\varphi\,\Delta y\\\text{oder}\qquad&\frac{\Delta z-\Delta\zeta}{z-\zeta}=\frac{\Delta y}{y}=\frac{\Delta v}{v}.\end{aligned}\right\}\ \ldots\ 8\,b).$$

Diese beiden Gleichungen sind nur die Bedingungen dafür, daß die beiden Strahlen auf ihrem unendlich kurzen Wege durch das Prisma als merklich parallel angesehen

werden können, was selbstverständlich der Fall sein muß, wenn ihre Konvergenzpunkte im Vergleich zu ihrem Wege im Prisma unendlich weit entfernt sind.

So haben wir zunächst zwei der unbekannten Größen $\Delta v$ und $\Delta \zeta$ durch die beiden anderen $\Delta y$ und $\Delta z$ ausgedrückt. Wir müssen uns nun aus den Gleichungen 7) durch Elimination zwei neue Gleichungen bilden, welche die verschwindende Größe $r_1$ nicht mehr enthalten, und aus welchen wir die Verhältnisse $\frac{\Delta z}{\Delta y}$ und $\frac{r_2}{r_0}$ bestimmen können.

Eine solche Gleichung erhalten wir, indem wir 7 b) und 7 d) addieren:

$$\left.\begin{aligned} -\frac{n^2}{r_0}\cos m\cos\nu\,\Delta y + \frac{1}{r_0}(1-n^2\cos^2\nu)\,\Delta z + \frac{n^2}{r_2}\cos\mu\cos\nu\,\Delta v \\ + \frac{1}{r_0}(1-n^2\cos^2\nu)\,\Delta\zeta = 0 \end{aligned}\right\} \quad \ldots \quad 8\,\text{c}).$$

Um die zweite zu erhalten, multiplizieren wir die Gleichung 7 a) mit

$$y = \frac{r_1}{\sin^2\varphi}(\cos m + \cos\mu\cos\varphi),$$

die Gleichung 7 c) mit

$$v = \frac{r_1}{\sin^2\varphi}(\cos\mu + \cos m\cos\varphi),$$

die Gleichung 7 b) mit

$$z - \zeta = r_1\cos\nu$$

und addieren die drei Gleichungen, so fallen die Glieder sämtlich heraus, welche mit $\frac{1}{r_1}$ multipliziert sind, und wir erhalten:

$$\left.\begin{aligned} \frac{y}{r_0}\{(1-n^2\cos^2 m)\,\Delta y - n^2\cos m\cos\nu\,\Delta z\} \\ + \frac{z-\zeta}{r_0}\{-n^2\cos m\cos\nu\,\Delta y + (1-n^2\cos^2\nu)\,\Delta z\} \\ + \frac{v}{r_2}\{1-n^2\cos^2\mu)\,\Delta v + n^2\cos\mu\cos\nu\,\Delta\zeta\} = 0 \end{aligned}\right\} \quad \ldots \quad 8\,\text{d}).$$

Wenn man aus 8 a) und 8 b) die Werte von $\Delta v$ und $\Delta\zeta$ in $\Delta y$ und $\Delta z$ ausgedrückt nimmt, und sie in 8 c) und 8 d) substituiert, erhält man zwei Gleichungen, welche die unbekannten Größen $\frac{\Delta z}{\Delta y}$ und $\frac{r_2}{r_0}$ enthalten. Eliminiert man eine von ihnen, so erhält man für die andere eine quadratische Gleichung, welche je zwei Werte liefert. Da man so für jede Kombination beliebig gewählter Werte der Winkel $m$, $\mu$, $\nu$ einen oder zwei bestimmte Zahlenwerte des Verhältnisses $\frac{r_2}{r_0}$ bekommt, so ist für jede gegebene Richtung des Strahlenbündels $r_2$ proportional $r_0$, wenn dieses sich ändert. Wird $r_0$ unendlich groß, so wird es auch $r_2$. Die Eliminationsgleichungen hier hinzuschreiben, ist nicht nötig. Wir wollen nur die besonderen Fälle untersuchen, welche uns für die Versuche interessieren.

Zuerst untersuchen wir, in welchen Fällen homozentrisches Licht nach der Brechung im Prisma homozentrisch bleibt. Wenn sich alle Strahlen

schneiden sollen, welche vom leuchtenden Punkte ausgegangen sind, so müssen die Bedingungen des Schneidens 8c) und 8d) erfüllt sein, welches auch die Werte von $\Delta y$ und $\Delta z$ sein mögen, die man wählt. Man kann also jede dieser Größen für sich gleich Null setzen, und erhält dadurch folgende Bedingungen.

1. Wenn man in 8c) $\Delta y = 0$ setzt, wobei auch nach 8a) und 8b) $\Delta v = 0$ und $\Delta \zeta = \Delta z$

$$\left(\frac{1}{r_0} + \frac{1}{r_2}\right)(1 - n^2 \cos^2 v) = 0 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 9a).$$

Da nun nach 6a) $n \cos v = \frac{e - z}{r_0}$, so kann der zweite Faktor dieser Gleichung nur gleich Null werden, wenn $r_0 = e - z$, wenn also der Lichtstrahl die brechende Fläche streifte wobei er nicht eindringen würde. Es muß also der erste Faktor von 9a) gleich Null sein, d. h.

$$r_2 = -r_0.$$

2. Wenn man in (8d) $\Delta z = 0$ setzt, und $r_2 = -r_0$, so wird

$$0 = (1 + n^2 \sin^2 v + n^2 \cos^2 v)(\cos^2 m - \cos^2 \mu).$$

Der erste Faktor ist $1 + n^2$, also nie gleich Null, daraus folgt

$$\cos m = \pm \cos \mu \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 9b).$$

3. Wenn man entweder in 8c) $\Delta z = 0$, oder in 8d) $\Delta y = 0$ setzt, und $r_2 = -r_0$, so wird mit Berücksichtigung von 6b)

$$(1 - n^2) \cos v \sin^2 \varphi = 0.$$

Da aber $\varphi$ der brechende Winkel des Prisma ist, $\sin \varphi$ also nicht gleich Null werden darf, so folgt

$$\left.\begin{aligned} \cos v &= 0 \\ e = z &= \zeta = \gamma \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 9c).$$

Der Strahl liegt also ganz in einer auf der brechenden Kante senkrechten Ebene. Unter diesen Verhältnissen schreiben wir die Gleichung (9b) gemäß (6a) unter der Form

$$y - v \cos \varphi = \pm (v - y \cos \varphi),$$
$$y(1 \pm \cos \varphi) = \pm v(1 \pm \cos \varphi),$$

also

$$y = v \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 9d).$$

Nun ist, wenn $\varepsilon$ den Einfallswinkel an der ersten Fläche bezeichnet, $\varepsilon_1$ den Brechungswinkel, $\eta_1$ den (im Prisma liegenden) Einfallswinkel an der zweiten Fläche, $\eta$ den (in der Luft liegenden) Brechungswinkel

$$\cos \varepsilon_1 = \frac{v \sin \varphi}{r_1}, \qquad \cos \eta_1 = \frac{y \sin \varphi}{r_1},$$

also unter den gemachten Voraussetzungen

$$\cos \varepsilon_1 = \cos \eta_1,$$

also auch

$$\sin \varepsilon = n \sin \varepsilon_1 = n \sin \eta_1 = \sin \eta,$$

d. h. die Winkel zwischen dem Strahl und den Einfallsloten beider Flächen sind auf beiden Seiten des Prisma gleich.

Diese Richtung, in welcher homozentrische Strahlen durch das Prisma gehen müssen, um homozentrisch zu bleiben, ist noch dadurch ausgezeichnet, daß in ihr auch die Ablenkung des Strahls von seinem ursprünglichen Wege ein Minimum ist.

Wenn wir die Koordinaten des ersten Systems $a$, $b$, $c$, $x$ und $y$ nach Gleichung 5a) in solche des zweiten Systems verwandeln, so erhalten wir die Cosinus der Winkel, welche der ankommende Strahl mit den Achsen der $\alpha$, $\beta$ und $\gamma$ im zweiten Systeme macht, beziehlich gleich

$$-\frac{a\cos\varphi+(b-y)\sin\varphi}{r_0},\qquad \frac{(b-y)\cos\varphi-a\sin\varphi}{r_0},\qquad \frac{c-z}{r_0};$$

die entsprechenden Cosinus der Winkel, welche der austretende Strahl mit den Achsen der $\alpha$, $\beta$ und $\gamma$ macht, sind

$$\frac{\alpha}{r_2},\qquad \frac{\beta-v}{r_2},\qquad \frac{\gamma-\zeta}{r_2}.$$

Wenn wir den Winkel zwischen der Richtung des ankommenden und der Richtung des ausgetretenen Strahls mit $\omega$ bezeichnen, so ist

$$\left.\begin{aligned}\cos\omega=-\frac{[a\cos\varphi+(b-y)\sin\varphi]}{r_0}\frac{\alpha}{r_2}+\frac{[(b-y)\cos\varphi-a\sin\varphi]}{r_0}\frac{(\beta-v)}{r_2}\\ +\frac{(c-z)}{r_0}\frac{(\gamma-\zeta)}{r_2}\end{aligned}\right\}\ 10).$$

Mittels der Gleichungen 5) und 6) kann man hieraus die Größen $a$, $b$, $c$, $\alpha$, $\beta$ und $\gamma$ eliminieren. Es ist zunächst

$$\left.\begin{aligned}\frac{a}{r_0}&=\sqrt{1-n^2\frac{(y-v\cos\varphi)^2+(z-\zeta)^2}{r_1^2}}=\sqrt{\frac{n^2v^2\sin^2\varphi}{r_1^2}-(n^2-1)}\\ \frac{\alpha}{r_2}&=\sqrt{1-n^2\frac{(v-y\cos\varphi)^2+(z-\zeta)^2}{r_1^2}}=\sqrt{\frac{n^2y^2\sin^2\varphi}{r_1^2}-(n^2-1)}\end{aligned}\right\}\ 10\,a).$$

Wenn eine der beiden Wurzeln imaginär werden sollte, haben wir an der entsprechenden Fläche totale Reflexion des Strahls. Für die Quotienten $\frac{b-y}{r_0}$, $\frac{c-z}{r_0}$, $\frac{\beta-v}{r_2}$, $\frac{\gamma-\zeta}{r_2}$ geben die Gleichungen 6) unmittelbar die passenden Werte. Denkt man diese in den obigen Ausdruck von $\cos\omega$ eingesetzt, so erhält man $\cos\omega$ ausgedrückt durch $y$, $v$, $z$ und $\zeta$, und zwar kann man es leicht so einrichten, daß die beiden letzteren Größen nur noch in $r_1$ enthalten darin vorkommen. Man erhält folgenden Wert:

$$\left.\begin{aligned}\cos\omega=&-n^2+n^2\frac{\sin^2\varphi}{r_1^2}(y^2-yv\cos\varphi+v^2)\\ &-n\frac{\sin\varphi}{r_1^2}(y-v\cos\varphi)\sqrt{n^2y^2\sin^2\varphi-(n^2-1)r_1^2}\\ &-n\frac{\sin\varphi}{r_1^2}(v-y\cos\varphi)\sqrt{n^2v^2\sin^2\varphi-(n^2-1)r_1^2}\\ &-\frac{\cos\varphi}{r_1^2}\sqrt{n^2y^2\sin^2\varphi-(n^2-1)r_1^2}\sqrt{n^2v^2\sin^2\varphi-(n^2-1)r_1^2}\end{aligned}\right\}\ 10\,b).$$

Betrachten wir die Größen $x$ und $y$ als konstant, und suchen $v$ und $\zeta$ so zu bestimmen, daß der Winkel $\omega$ ein Maximum wird, so müssen wir setzen

$$\frac{d\omega}{dv} = 0 \quad \text{und} \quad \frac{d\omega}{d\zeta} = 0.$$

Die letztere Gleichung können wir, da $\zeta$ nur in $r_1$ erhalten im Werte von $\cos\omega$ vorkommt, auch schreiben

$$\frac{d\omega}{d\zeta} = -\frac{1}{\sin\omega}\frac{d(\cos\omega)}{d(r_1^2)} \cdot (\zeta - z) = 0.$$

Diese Gleichung wird für alle Werte von $v$ erfüllt, wenn wir setzen

$$\zeta - z = 0.$$

Nur dann würde diese Annahme nicht hinreichen, wenn entweder $\sin\omega = 0$, der Strahl also gar nicht gebrochen würde, was nur bei parallelen brechenden Flächen vorkommen kann, oder wenn der Differentialquotient von $\cos\omega$ einen unendlichen Wert annehmen könnte, dadurch daß ein darin vorkommender Nenner gleich Null würde. Man sieht leicht aus 10b), daß nur $r_1$ und die beiden Wurzeln im Nenner vorkommen können. Es kann aber $r_1$ nicht gleich Null werden, solange $y$ und $v$ positive, wenn auch unendlich kleine Werte haben, die sie haben müssen, wenn der Strahl durch das Prisma gehen soll. Es können ferner die Wurzeln wegen der Gleichungen 6a) nicht gleich Null werden, wenn der Strahl in den Raum vor und hinter dem Prisma eintreten soll. Wir erfüllen also die Bedingung

$$\frac{d\omega}{d\zeta} = 0$$

für alle Werte von $v$, indem wir setzen

$$z = \zeta.$$

Daraus folgt, wie oben, nach den Gleichungen 6) auch

$$z = c \quad \text{und} \quad \zeta = \gamma,$$

sämtliche Teile des Strahls verlaufen alsdann in einer auf der brechenden Kante (Achse der $z$) senkrechten Ebene.

Um die zweite Bedingung zu erfüllen, welche erfüllt werden muß, um $\omega$ zu einem Maximum zu machen, nämlich

$$\frac{d\omega}{dv} = 0,$$

können wir den Ausdruck für $\cos\omega$ zuerst dadurch vereinfachen, daß wir darin $z = \zeta$ setzen, also

$$r_1^2 = y^2 + v^2 - 2yv\cos\varphi.$$

Führen wir statt $v$ eine neue Variable $q$ ein, indem wir setzen

$$v = qy,$$

so verschwindet aus dem Ausdruck für $\cos\omega$ in Gleichung 10b) mit $v$ gleichzeitig auch $y$ und $\cos\omega$ wird eine Funktion von $q$ allein

$$\cos\omega = \varphi_{(q)}.$$

Da nun aber cos $\omega$ seinen Wert behält, wenn wir überall die Buchstaben $y$ und $v$ miteinander vertauschen, so muß für jeden Wert von $q$ sein

$$\cos\omega = \varphi_{(q)} = \varphi_{\left(\frac{1}{q}\right)}.$$

Setzen wir ferner

$$\frac{d\varphi_{(q)}}{dq} = \varphi^1{}_{(q)}$$

so ist

$$\frac{d\cos\omega}{dv} = \frac{1}{y}\cdot\varphi^1{}_{(q)} = -\frac{1}{y}\varphi^1{}_{\left(\frac{1}{q}\right)}\frac{1}{q^2}.$$

Für $v = y$, d. h. $q = 1$ wird

$$\varphi_{(1)} = -\varphi_{(1)},$$

woraus folgt

$$\varphi_{(1)} = 0,$$

also auch

$$\frac{d\cos\omega}{dv} = 0$$

und wenn nicht gleichzeitig sin $\omega = 0$, auch

$$\frac{d\omega}{dv} = -\frac{d\cos\omega}{dv}\cdot\frac{1}{\sin\omega} = 0.$$

Wenn also

$$x = \xi \quad \text{und} \quad y = v$$

ist gleichzeitig

$$\frac{d\omega}{d\xi} = 0 \quad \text{und} \quad \frac{d\omega}{dv} = 0$$

und $\omega$ ein Grenzwert. Die Untersuchung der zweiten Differentialquotienten zeigt, daß $\omega$ in diesem Falle ein Maximum ist. Der Winkel zwischen der Verlängerung des eintretenden Strahls und dem gebrochenen Strahle, welcher der Nebenwinkel von $\omega$ ist und die Ablenkung des Strahls von seiner ursprünglichen Bahn mißt, wird dabei ein Minimum.

Der Maximalwert von $\omega$ findet sich, wenn man in 10b) $y = v$ und $x = \xi$ setzt

$$\omega = \varphi + 2\arccos\left[n\sin\frac{\varphi}{2}\right] \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 10c).$$

Ein unendlich dünnes Bündel homozentrischer Strahlen, welches von einem endlich entfernten Punkte ausgeht, bleibt nach dem Durchtritt durch ein Prisma also nur dann homozentrisch, wenn es im Minimum der Ablenkung durchgetreten ist, d. h. wenn es in einer zur brechenden Kante senkrechten Ebene verläuft, und gegen beide Prismenflächen unter gleichen Winkeln geneigt ist.

Unter diesen Umständen wird also vom leuchtenden Punkte durch das Prisma ein potentielles Bild entworfen, welches auf derselben Seite und in derselben Entfernung vom Prisma liegt, wie sein Objekt. Das Bild liegt aber an einem anderen Orte, vom Prisma gesehen um den Winkel $\frac{\pi}{2} - \omega$ verschoben nach der Seite der brechenden Kante hin.

### Nicht homozentrische Brechung.

Wenn ein Lichtpunkt betrachtet wird, kann sein Bild nur unter der Bedingung deutlich sein, daß das gebrochene Licht homozentrisch sei. Wird aber eine Lichtlinie betrachtet, so schaden Abweichungen der Strahlen, die in Richtung des Bildes dieser Linie liegen, nicht der Genauigkeit des Bildes. Dies ist nun der gewöhnliche Fall im Spektrum. Ist nun die Lichtlinie der brechenden Kante des Prisma oder der Achse der $x$ parallel, so schaden Abweichungen in Richtung der $x$ nichts, wohl aber solche in der darauf senkrecht stehenden durch den Strahl gelegten Ebene. Sollen Abweichungen nur in Richtung der $z$ vorkommen, so müssen wir in den Gleichungen 8) $\Delta y = 0$ setzen, also auch $\Delta v = 0$, $\Delta x = \Delta \zeta$, und erhalten aus 8c) und 8d)

$$\left(\frac{1}{r_0} + \frac{1}{r_2}\right)(1 - n^2 \cos^2 \nu) = 0,$$

also

$$r_2 = - r_0 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 11\,a)$$

und zweitens

$$(1 - n^2) \cos \nu \sin^2 \varphi = 0,$$

woraus wie oben folgt:

$$\cos \nu = 0$$

$$c - z = z - \zeta = \gamma - \zeta = 0.$$

Wenn die letztere Bedingung erfüllt ist, liegen die Abweichungen $\Delta y$ in einer durch den Strahl senkrecht gegen die $\Delta z$ gelegten Ebene. Ihnen entspricht also die zweite Konvergenzebene, welche senkrecht auf der bisher betrachteten sein muß. Die zugehörige Vereinigungsweite der Strahlen für die auf der brechenden Kante senkrechte Konvergenzebene ergibt sich, wenn wir in 8d) $\Delta z = 0$ setzen und $\cos \nu = 0$, woraus auch $\Delta \zeta = 0$ folgt

$$\frac{1}{r_0}(1 - n^2 \cos^2 m) y^2 + \frac{1}{r_2}(1 - n^2 \cos^2 \mu) v^2 = 0,$$

oder wenn wir wie vorher die Einfallswinkel an den beiden Prismenflächen in Luft mit $\varepsilon$ und $\eta$, im Glas mit $\varepsilon_1$ und $\eta_1$ bezeichnen

$$\cos \varepsilon_1 = \frac{v \sin \varphi}{r_1} \qquad \cos \eta_1 = \frac{y \sin \varphi}{r_1}$$

$$\sin \varepsilon = n \sin \varepsilon_1 = n \frac{y - v \cos \varphi}{r_1} = n \cos m$$

$$\sin \eta = n \cos \mu,$$

so folgt

$$\frac{r_2}{r_0} = - \frac{\cos^2 \varepsilon_1 \cos^2 \eta}{\cos^2 \varepsilon \cos^2 \eta_1} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 11\,b)$$

oder

$$r_2 \frac{\cos^2 \eta_1}{\cos^2 \eta} = - r_0 \frac{\cos^2 \varepsilon_1}{\cos^2 \varepsilon}$$

$$r_2 \left[1 + \frac{n^2 - 1}{\cos^2 \eta}\right] = - r_0 \left[1 + \frac{n^2 - 1}{\cos^2 \varepsilon}\right].$$

In dieser letzten Form erkennt man leicht, daß $r_2$ wächst, $r_0$ abnimmt, wenn $\eta$ abnimmt und $\varepsilon$ wächst. Die größere Vereinigungsweite kommt also den Strahlen auf der Seite des Prismas zu, wo der Einfallswinkel kleiner ist.

Im Minimum der Ablenkung, wo $\varepsilon = \eta$, wird auch $r_2 = -r_0$, die Vereinigungsweite in der zur brechenden Kante senkrechten Ebene also gleich weit mit der Vereinigungsweite in der jener Kante parallelen Ebene.

Das Bild einer der brechenden Kante parallelen leuchtenden Linie wird da entworfen, wo die Vereinigung der Strahlen in einer zur brechenden Kante senkrechten Ebene stattfindet nach Gleichung 11b). Die Entfernung des Bildes einer der brechenden Kante parallelen Lichtlinie vom Prisma ist also größer als die Entfernung des Objekts, wenn der Einfallswinkel an der ersten Fläche des Prismas, auf welches die Lichtstrahlen fallen, größer ist als beim Minimum der Ablenkung. Die Entfernung des Bildes ist dagegen kleiner als die des Objekts, wenn jener Einfallswinkel kleiner ist.

Betrachtet man also eine solche Lichtlinie durch ein Prisma mit bloßem Auge oder mit dem Fernrohr, so muß man für das Minimum der Ablenkung Auge oder Fernrohr für die Entfernung des wirklichen Objekts einrichten. Wenn man aber das Prisma dann um eine der brechenden Kante parallele Achse dreht, muß man auch die Einrichtung des Auges oder Fernrohrs passend abändern. Nur wenn das Objekt unendlich weit entfernt ist, ist auch das Bild unendlich weit entfernt, und die Einrichtung des Auges oder Fernrohrs kann für jede Stellung des Prismas dieselbe bleiben.

Wenn der leuchtende Gegenstand eine vertikale helle Linie ist, welche einfarbiges, z. B. rotes Licht aussendet, so ist ihr Bild, wie es durch ein vertikal stehendes Prisma erscheint, wieder eine vertikale Linie. Geht von der leuchtenden Linie auch noch violettes Licht aus, so entwirft das Prisma auch mittels der violetten Strahlen ein Bild, welches eine vertikale Linie ist, die aber weiter entfernt von dem leuchtenden Objekte ist, als die rote Linie, weil das violette Licht stärker gebrochen wird. Geht endlich von der leuchtenden Linie Licht von allen Graden der Brechbarkeit aus zwischen Rot und Violett, so entspricht jedem einzelnen Grade der Brechbarkeit ein besonderes Bild der vertikalen Linie und diese linienförmigen Bilder reihen sich zwischen dem roten und violetten Bilde ein in der Ordnung ihrer Brechbarkeit, und bilden ein Spektrum von rechteckiger Gestalt. Sind in dem Lichte des leuchtenden Objekts Strahlen von allen kontinuierlich ineinander übergehenden Graden der Brechbarkeit enthalten, so bildet auch das Spektrum eine kontinuierlich leuchtende Fläche. Fehlen einzelne Stufen der Brechbarkeit, so fehlen auch im Spektrum die entsprechenden linienförmigen Bilder, und man sieht an ihrer Stelle dunkle vertikale Linien das Spektrum durchziehen, die Fraunhoferschen Linien.

### Scheinbare Breite der prismatischen Bilder.

Da man nun leuchtende geometrische Linien nicht herstellen kann, sondern bei den Versuchen immer schmale leuchtende Flächen als Objekte benutzen muß, so haben auch deren Bilder eine gewisse Breite, welche wir jetzt bestimmen wollen.

Nennen wir wieder $\varepsilon$ und $\varepsilon_1$ Einfalls- und Brechungswinkel an der ersten, $\eta_1$ und $\eta$ Einfalls- und Brechungswinkel an der zweiten Fläche, so daß die

Winkel $\varepsilon_1$ und $\eta_1$ innerhalb des Prismas liegen, den brechenden Winkel selbst $\varphi$, so ist

$$\left.\begin{aligned} \sin\varepsilon &= n\sin\varepsilon_1 \\ \sin\eta &= n\sin\eta_1 \\ \eta_1 + \varepsilon_1 &= \varphi \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 12).$$

Nun sei der Spalt sehr weit entfernt und der sehr kleine Gesichtswinkel, unter dem er vom Orte des Prismas aus gesehen wird, sei $d\varepsilon$, so daß der Einfallswinkel des Lichts vom einen Rande des Spalts $\varepsilon$, vom anderen $\varepsilon + d\varepsilon$ sei. Die Winkel $\varepsilon_1$, $\eta_1$ und $\eta$ werden für diesen letzteren Strahl beziehlich $\varepsilon_1 + d\varepsilon_1$, $\eta_1 + d\eta_1$ und $\eta + d\eta$. Aus den obigen Gleichungen 12) folgt dann durch Differentiieren:

$$\begin{aligned} \cos\varepsilon\, d\varepsilon &= n\cos\varepsilon_1\, d\varepsilon_1, \\ \cos\eta\, d\eta &= n\cos\eta_1\, d\eta_1, \\ d\eta_1 + d\varepsilon_1 &= 0. \end{aligned}$$

Durch Elimination von $d\varepsilon_1$ und $d\eta_1$ erhält man

$$-\frac{\cos\varepsilon\cdot\cos\eta_1}{\cos\eta\cdot\cos\varepsilon_1}\, d\varepsilon = d\eta \quad \ldots\ldots\ldots \quad 12a),$$

$d\eta$ ist der Gesichtswinkel, unter dem der Spalt nach der Brechung im Prisma erscheint; seine Größe ist durch diese Gleichung gegeben. Geschieht diese Brechung im Minimum der Ablenkung, so daß

$$\varepsilon = \eta, \quad \varepsilon_1 = \eta_1,$$

so wird

$$-d\varepsilon = d\eta.$$

Die scheinbare Größe des Spalts bleibt also unter diesen Umständen unverändert.

Der größte Wert für $\varepsilon$ ist ein rechter Winkel; wenn der Strahl längs der brechenden Fläche nach der brechenden Kante hinläuft, dann bleiben die anderen Winkel spitze Winkel, so daß ihre Cosinus nicht gleich Null werden, und es wird

$$d\eta = 0.$$

Bei dieser Stellung ist also das Bild des Spaltes unendlich schmal; aber man kann bei praktischen Anwendungen sich der streifenden Incidenz des Lichts wohl nähern, aber sie natürlich nie ganz erreichen. Das Entgegengesetzte ist der Fall, wenn man das Prisma so hält, daß das austretende Licht die Fläche beinahe streift, daß also $\cos\eta$ nahehin gleich Null wird. Dann ist

$$\frac{d\eta}{d\varepsilon} = -\infty.$$

Ist $r_0$ die Entfernung des Spalts vom Prisma und $r_2$ die scheinbare Entfernung seines Bildes vom Prisma für horizontal divergente Strahlen, so folgt aus 11b), daß

$$\sqrt{r_0} : \sqrt{r_2} = d\eta : d\varepsilon \quad \ldots\ldots\ldots \quad 12b).$$

Reinheit des Spektrums. Je kleiner der Unterschied $dn$ des Brechungsverhältnisses derjenigen Farben ist, die an demselben Orte des Spektrums zusammentreffen, desto reiner ist das Spektrum, wir können also die Größe des angegebenen $dn$ als Maß der Unreinheit betrachten.

Wenn wir als gebrochenen Strahl denjenigen festhalten, welcher von dem betreffenden Orte des Spektrums nach dem Knotenpunkte des Auges verläuft, so ist dessen Lage, also auch der Winkel $\eta$ fest gegeben. Dagegen variiert der Winkel $\varepsilon$ für Strahlen, die von verschiedenen Teilen des Spalts kommen, und das Brechungsverhältnis variiert für verschiedene Farben. Betrachten wir nun in den drei Gleichungen

$$\begin{aligned} \sin\varepsilon &= n \sin\varepsilon_1 , \\ \sin\eta &= n \sin\eta_1 , \\ \eta_1 + \varepsilon_1 &= \varphi \end{aligned}$$

$\varphi$ und $\eta$ als konstant, $\varepsilon$, $\varepsilon_1$, $\eta_1$ und $n$ als variabel, so erhalten wir durch Differentiation folgende Gleichungen

$$\begin{aligned} \cos\varepsilon \, d\varepsilon &= \sin\varepsilon_1 \, dn + n \cos\varepsilon_1 \, d\varepsilon_1 , \\ 0 &= \sin\eta_1 \, dn + n \cos\eta_1 \, d\eta_1 , \\ d\eta_1 + d\varepsilon_1 &= 0. \end{aligned}$$

Durch Elimination von $d\varepsilon_1$ und $d\eta_1$ erhalten wir

$$\begin{aligned} \cos\varepsilon \cdot \cos\eta_1 \cdot d\varepsilon &= (\sin\varepsilon_1 \cos\eta_1 + \cos\varepsilon_1 \sin\eta_1) \, dn \\ &= \sin\varphi \cdot dn . \end{aligned}$$

Wenn wir unter $d\varepsilon$ die scheinbare Breite des Spalts vom Prisma aus gesehen verstehen, ist das Maß der Unreinheit des Spektrums

$$dn = \frac{\cos\varepsilon \cdot \cos\eta_1}{\sin\varphi} \, d\varepsilon \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 13).$$

Wenn $\varepsilon$ sich einem rechten Winkel nähert, also bei streifender Incidenz des Lichts, wird $\cos\varepsilon = 0$, und demnach auch $dn = 0$. Das Spektrum wird dann also bei gegebener Größe des Spalts am reinsten, aber gleichzeitig wird auch die Apertur des Prismas bei so schiefer Inzidenz sehr klein, der Lichtverlust durch Reflexion sehr groß, so daß es im ganzen vorteilhafter bleibt, die Reinheit des Spektrums durch Verengerung des Spalts (Verkleinerung von $d\varepsilon$) zu erreichen, was ja meist keine Schwierigkeiten hat.

Was die Helligkeit des Spektrums betrifft, so verhält sich die Helligkeit $h$ des Spalts, die er für irgend eine einzelne homogene Farbe hat, zu der seines Bildes umgekehrt wie seine Breite $d\varepsilon$ zu der des Bildes $d\eta$, wenn man übrigens von den Verlusten absieht, die das Licht durch Reflexion an den Glasflächen erleidet, und wenn die Apertur des Prismas größer als die Pupille ist, oder beim Gebrauch eines Fernrohrs größer als das Objektivglas. Also

$$h \, d\varepsilon = h_1 \, d\eta$$

oder mit Benutzung des früher gefundenen Verhältnisses von $d\varepsilon$ und $d\eta$

$$h_1 = h \frac{\cos\eta \cos\varepsilon_1}{\cos\varepsilon \cos\eta_1} .$$

Nun ist die Helligkeit $H$ irgend einer Stelle des Spektrums aber gleich der Summe der Helligkeiten $h_1$ aller einzelnen homogenen Farben, welche sich dort decken. Im allgemeinen können wir annehmen, daß einfache Farben von sehr kleinem Unterschiede der Wellenlänge $\lambda$ dieselbe Helligkeit haben. Bezeichnen wir also mit $d\lambda$ und $dn$ dies Intervall der Wellenlänge und Brechbarkeit, innerhalb deren die sich deckenden Farben liegen, so können wir setzen

$$H = h_1 d\lambda = h_1 \frac{d\lambda}{dn} dn ,$$

woraus mit Berücksichtigung des in 13) gefundenen Wertes von $dn$ folgt:

$$H = h \frac{\cos\eta \cos\varepsilon_1}{\sin\varphi} d\varepsilon \cdot \frac{d\lambda}{dn},$$

wo $d\varepsilon$ die scheinbare Breite des Spalts bezeichnet. Um die Bedeutung dieses Ausdrucks für $H$ zu verstehen, bemerken wir noch, daß wenn wir unter Voraussetzung einer geometrischen Lichtlinie statt des Spalts den Gesichtswinkel $d\eta$ bestimmen, unter welchem die innerhalb des Intervalls $dn$ vorkommenden Farben in dem ideell reinen Spektrum erscheinen, sich das Verhältnis $\frac{d\eta}{d\lambda}$, dessen Wert wir mit $l$ bezeichnen wollen, durch eine ähnliche Differentiation wie vorher findet

$$\frac{d\eta}{dn} = \frac{d\eta}{d\lambda}\frac{d\lambda}{dn} = l\frac{d\lambda}{dn} = \frac{\sin\varphi}{\cos\eta\cos\varepsilon_1}.$$

Dann wird

$$H = \frac{h \cdot d\varepsilon}{l}.$$

Abgesehen also von dem Verluste durch Reflexion und Absorption, ist die Helligkeit des Spektrums, unabhängig von der Brechkraft des Prismas und den Brechungswinkeln, direkt proportional der Helligkeit der betreffenden Farben im Spektrum, der scheinbaren Breite des Spalts und umgekehrt proportional der scheinbaren Länge des betreffenden Teils des Spektrums.

Wenn die Brechung im Minimum der Ablenkung geschieht, ist die scheinbare Breite des Spalts der seines Bildes gleich, und man kann $\frac{l}{d\varepsilon}$ als Maß der Reinheit des Spektrums betrachten. Dann ist also die Helligkeit des Spektrums bei gleichbleibender Helligkeit des durch den Spalt dringenden Lichts einfach umgekehrt proportional seiner Reinheit. Daraus folgt denn, daß zur Erreichung der größten Reinheit auch das intensivste Licht nötig ist.

Dagegen würde es theoretisch möglich sein, etwas größere Helligkeit bei gleicher Reinheit des Spektrums zu gewinnen, wenn man den Einfallswinkel an der ersten brechenden Fläche vergrößert, und den Spalt breiter macht; um aber die Länge des Spektrums konstant zu erhalten, müßte man auch noch den brechenden Winkel vergrößern. Indessen läßt sich praktisch dadurch nichts gewinnen, weil der Lichtverlust durch Reflexion immer größer wird, und die kleinen Abweichungen der brechenden Flächen von einer vollkommenen Ebene das Bild desto mehr verwirren, je größer der Einfallswinkel ist.

Bisher ist der Gebrauch des Prismas ohne Vergrößerungsgläser vorausgesetzt worden. Das prismatische Spektrum kann nun aber auch wie jedes andere optische Bild als Objekt für ein Fernrohr gebraucht und beliebig vergrößert werden. Dabei wird die Reinheit des Spektrums natürlich nicht verändert, und wenn das Fernrohr eine hinreichend große Apertur hat, um die gesehenen Gegenstände in ihrer natürlichen Helligkeit zu zeigen, und die Apertur des Prismas dieser gleichkommt, so ist auch die Helligkeit des vergrößerten Bildes

unverändert. Auch bleiben die in dem Vorausgehenden hingestellten Regeln über Helligkeit und Reinheit des Spektrums unverändert, wenn man unter $d\varepsilon$ die scheinbare Größe des Spalts, unter $d\eta$ die seines Bildes, unter $l$ die Länge des bestimmten Teils des Spektrums versteht, wie sie durch das Fernrohr erscheinen. Aus der für die Helligkeit hingestellten Bedingung ergibt sich übrigens, warum für Versuche ohne Fernrohr ganz kleine Prismen ausreichen, während man für Fernrohrversuche desto größere haben muß, je stärker die Vergrößerung.

Bei der Einstellung des Fernrohrs auf das Spektrum hat man noch zu beachten, daß die Farbenstreifen und dunkeln Linien scharf erscheinen, wenn die horizontal divergierenden Strahlen vereinigt werden (Spalt und brechende Kante, wie hier immer, senkrecht gedacht), die obere und untere Begrenzungslinie des Spektrums dagegen und andere horizontale Linien, die durch kleine Unregelmäßigkeiten der Grenzen des Spalts oder durch Staubfäden in ihm leicht im Spektrum entstehen können, scharf erscheinen, wo die vertikal divergierenden Strahlen vereinigt werden. Nur bei der Stellung des Prismas daher, welche das Minimum der Ablenkung gibt, kann man das Fernrohr gleichzeitig auf die vertikalen und horizontalen Linien einstellen. Und zwar braucht man bei vollkommen ebenen Prismenflächen dazu dieselbe Einstellung des Fernrohrs, wie um den Spalt direkt ohne Prisma deutlich zu sehen. Dreht man, vom Minimum der Ablenkung ausgehend, dagegen die brechende Kante des Prismas mehr gegen das Objektivglas des Fernrohrs hin, so muß man für die Farbenstreifen und dunkeln Linien eine Einstellung auf größere Entfernung nehmen, bei einer entgegengesetzten Drehung des Prismas dagegen auf eine kleinere Entfernung, während die Einstellung für die horizontalen Linien in beiden Fällen unverändert bleibt.

Um ein Spektrum herzustellen, läßt man Licht durch einen engen Spalt auf ein Prisma fallen, das hindurchgegangene Licht kann man entweder direkt in das Auge oder ein Fernrohr fallen lassen, oder es durch eine Linse zu einem objektiven Bilde des Spektrums kondensieren.

Als Lichtquelle kann man jeden leuchtenden Körper benutzen, bekanntlich ist die Helligkeit der einzelnen Farben in dem Lichte verschiedener selbstleuchtender Körper, irdischer sowohl als himmlischer von verschiedener Stärke, die Anordnung der dunkeln und hellen Linien ist verschieden. Will man das Spektrum des Sonnenlichts zu den Versuchen benutzen, so genügt für Spektren, in denen man nur die gröberen dunkeln Linien und nur die gewöhnlich sichtbaren Farben sehen will, das von einem Spiegel reflektierte Licht des Himmels oder ein von der Sonne beschienenes Papierblatt; nur ist in dem ersteren das Gelb und Orange ein wenig schwach. Man hat hierbei den Vorteil, daß diese Art der Beleuchtung lange Zeit unverändert sich erhält. Um die stärkeren dunkeln Linien $D$, $F$ und $G$ zu sehen, genügt schon ein Spalt von 1 mm Breite in 400 mm Entfernung durch ein Flintglasprisma, dessen brechender Winkel $50^0$ beträgt, mit bloßem Auge betrachtet; entfernt man sich doppelt so weit vom Spalte, so sieht man schon die meisten von Fraunhofer mit großen Buchstaben bezeichneten Linien. Man muß nur gerade die Stellung des Prismas suchen, bei welcher sich das Auge für die Linien akkommodieren kann.

Braucht man ein Spektrum von größerer Reinheit, in welchem auch die feineren dunkeln Linien sichtbar werden sollen, oder will man die äußersten Grenzen des Spektrums sichtbar machen, so muß man einen Spiegel aufstellen, welcher Licht von den der Sonne benachbarten Teilen des Himmels, oder von der Sonne selbst durch den Spalt auf das Prisma wirft, und diesen Spiegel, da die Sonne ihren Ort am Himmel

ändert. entweder etwa alle drei Minuten von neuem einstellen, oder ihn an einen Heliostaten befestigen, welcher ihm eine entsprechende Bewegung mitteilt.

Den Spalt, durch welchen das Licht dringt, und welcher das eigentliche Objekt des prismatischen Bildes ist, kann man für Versuche, bei denen es nicht auf die feineren dunkeln Linien ankommt, oder wenn man seine Entfernung vom Prisma sehr groß machen kann, leicht aus undurchsichtigem Papier schneiden. Muß man dagegen einen sehr feinen Spalt anwenden, so dienen dazu am besten die Gravesandeschen Schneiden. Auf einer viereckigen Messingplatte Fig. 11 sind zwei gerade Schienen *a b*, *a b* befestigt, zwischen deren Enden *a a* eine Platte *a a c c* festliegt, deren Rand *c c* zugeschärft ist. Ihm gegenüber steht der zugeschärfte Rand *d d* einer anderen zwischen den Schienen verschiebbaren Platte *d d e e*. Letztere wird mittels einer Schraube *f* mit sehr feinen Windungen, deren Mutter in dem auf der Grundplatte drehbar befestigten Zapfen *g* liegt, bewegt. Man kann auf diese Weise die beiden Schneiden *c c* und *d d* in sehr kleine Entfernungen voneinander fein einstellen, wobei sie, wenn das Instrument gut gearbeitet ist, stets parallel bleiben. Die Grundplatte hat an der den Schneiden entsprechenden Stelle einen Ausschnitt, welcher das zwischen den Schneiden durchgegangene Licht frei weiter gehen läßt.

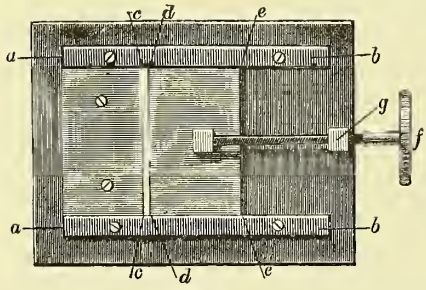


Fig. 11.

Die Gravesandeschen Schneiden müssen in der Mitte eines hinreichend großen dunkeln Schirms befestigt und ihre dem Beobachter zugekehrte Seite selbst geschwärzt sein. Der Schirm muß groß genug sein, daß in der Nähe des Spalts nirgends ein beleuchteter Gegenstand sichtbar ist, dessen Spektrum bis zu dem des Spalts hinreichen könnte. Bei allen Versuchen, wo nicht die vollständige Entfernung der letzten Reste weißen Lichts erfordert wird, kommt es mehr darauf an, daß der Schirm, in welchem sich der Spalt befindet, gleichmäßig dunkel, als daß er absolut dunkel sei. Überall wo eine Verschiedenheit der Beleuchtung, selbst nur der Gegensatz von Sammetschwarz und Grauschwarz sich findet, zeigt das Prisma Farben, während eine gleichmäßig beleuchtete Fläche dergleichen nicht zeigt. Man kann also eine große Zahl solcher Versuche vollständig gut in einem hellen Zimmer ausführen, wenn man nur den Spalt in einem genügend großen und gleichmäßig schwarz gefärbten Schirm anbringt.

Wenn es dagegen auf vollständige Entfernung des weißen Lichts ankommt, wie bei den Versuchen, welche die Unzerlegbarkeit und Unveränderlichkeit des homogenen Lichts nachweisen sollen, und bei den Untersuchungen der Grenzen des Spektrums, muß der Schirm, in welchem sich der Spalt befindet, absolut dunkel sein. Am leichtesten ist dies zu erreichen, wenn man über ein zu optischen Versuchen eingerichtetes dunkles Zimmer mit verschlossenen und dicht eingefugten Fensterläden verfügen kann. Man setzt dann die Platte mit den Schneiden gleich in eine Öffnung der Läden selbst ein. Übrigens läßt sich dasselbe oft auch in den gewöhnlichen Wohnzimmern erreichen, wenn man die Fenstervorhänge und Fensterläden bis auf eine schmale Spalte schließt, durch welche das Licht einfällt. Die Spalte wird im Boden eines schwarz ausgestrichenen Kastens angebracht, dessen offene Mündung dem Beobachter zugekehrt ist. Die Seitenwände des Kastens halten das seitlich einfallende Licht vom Grunde des Kastens ab, so daß dieser schon sehr dunkel wird. Neben den Spalt klebt man dann zwei Streifen schwarzen Sammets in den Grund des Kastens, deren Breite der Länge des Spalts gleich ist, und deren Länge die Länge des auf die Ebene des Spalts projizierten Spektrums um etwas übertrifft, so daß sich das ganze Spektrum auf der Fläche des Sammets entwirft. Außerdem muß man durch Aufstellung passender dunkler Schirme dafür

sorgen, daß kein Licht von den noch übrig gebliebenen helleren Stellen des Zimmers auf das Prisma oder die Linsen des Fernrohrs und das Auge des Beobachters fällt.

Die Herstellung eines absolut dunkeln Schirms in einem dunkeln Zimmer genügt aber noch nicht, um das Spektrum von den letzten sichtbaren Resten weißen Lichts zu befreien, so lange noch intensives Licht von mehreren Farben das Prisma selbst die Linsen des Fernrohrs und das Auge des Beobachters trifft. In der oben entwickelten Theorie für die Entstehung der prismatischen Bilder haben wir nur das regelmäßig gebrochene Licht berücksichtigt. Wir müssen aber bedenken, daß an jeder brechenden Fläche auch noch Licht reflektiert wird, und in jeder festen oder flüssigen durchsichtigen Substanz eine kleine Menge Licht unregelmäßig nach allen Richtungen hin zerstreut wird.

Was zunächst die Reflexionen betrifft, so kommen dergleichen erstens im Prisma vor, wenn diejenige Fläche des Prismas, welche der brechenden Kante gegenüberliegt, nicht mit schwarzer Ölfarbe oder Asphaltlack überzogen und ihrer Reflexionsfähigkeit beraubt ist. Ist sie matt geschliffen, so wird sie in der Regel, so oft Licht durch das Prisma geht, erleuchtet werden. Ist in Fig. 12 *a b c d* der Weg eines von *d* kommenden Strahls, und bei *a* das Auge des Beobachters, so erblickt der letztere in der scheinbaren Lage *f ε* ein Spiegelbild der Fläche *f e* des Prismas, welches hell erscheint, wenn diese Fläche erleuchtet ist, und also diffuses weißes Licht im Gesichtsfelde des Beobachters verbreitet. Ist die Fläche *f e* dagegen auch poliert, so reflektiert sie das Licht regelmäßig, und namentlich bei Prismen, deren Querschnitt ein gleichschenkliges Dreieck ist, gelangt außer dem Wege *d c b a* auch noch Licht auf dem Wege *d c b g c b a* nach drei Reflexionen bei *b*, *g* und *c* nach *a*. Dieses Licht ist nicht in Farben zerlegt, sondern weiß. Der Beobachter sieht vermittelst dieses Licht sein schwaches weißes Bild des Spalts in seinem Gesichtsfelde und kann es benutzen, um das Minimum der Ablenkung genau hervorzubringen. Bei Prismen, deren Querschnitt ein gleichschenkliges Dreieck ist, fällt nämlich dieses weiße Bild genau mit der Farbe des Spektrums zusammen, welche im Minimum der Ablenkung steht. Ein solches genau begrenztes schwaches weißes Bild des Spalts ist allerdings bei unseren Versuchen weniger zu fürchten, weil es einen verhältnismäßig kleinen Teil des Gesichtsfeldes einnimmt, es ist weniger schädlich, als das Spiegelbild der Fläche *f e*, wenn diese matt geschliffen ist. Dagegen kann nun auch durch diese Fläche Licht von seitlichen Gegenständen in das Auge des Beobachters kommen, für dessen Abblendung man sorgen muß. Am besten ist es jedenfalls, mit Ausnahme der beiden brechenden Flächen des Prismas alle übrigen zu schwärzen.

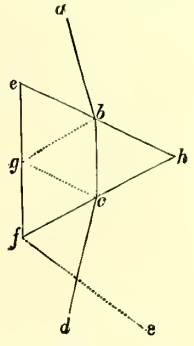


Fig. 12.

Wenn man das Spektrum durch ein Fernrohr beobachtet, kommen auch die Reflexionen an den vorderen und hinteren Flächen der Linsen in Betracht. Es werden dadurch kleine lichtschwache, regelmäßige Bildchen der vor dem Fernrohr liegenden Objekte entworfen, die aber meist so liegen, daß der Beobachter sein Auge nicht für sie akkommodieren kann, und die deshalb eine schwache weiße Beleuchtung des Gesichtsfeldes geben. Man bemerkt diese Beleuchtung leicht, wenn man ein Fernrohr auf einen tiefschwarzen Gegenstand richtet, während seitwärts sich sehr helle befinden. Das Gesichtsfeld grenzt sich dann als schwach erleuchtet gegen die schwarze Blendung des Okulars ab.

Einen ähnlichen, aber schwerer zu beseitigenden Effekt hat die Zerstreuung des Lichts in den Glasmassen. Eine jede noch so klare Glasmasse erscheint weißlich trübe, sobald man sie scharf von der Sonne beschienen vor dunklem Grunde betrachtet, namentlich wenn das Auge sich nahehin in der Richtung der durchgelassenen Strahlen befindet. Dasselbe ist, wie wir schon früher bemerkt haben,[1] der Fall mit der Horn-

[1] S. Bd. I, S. 16 und 165.

haut und Linse des menschlichen Auges. Wir müssen also berücksichtigen, daß jede der vom Lichte durchlaufenen Glasmassen eine, wenn auch verhältnismäßig kleine Menge des Lichts, welches überhaupt durch sie hingeht, diffus zerstreut und mit solchem Licht das Gesichtsfeld des Beobachters anfüllt. Ebenso ist auch stets eine sehr kleine Menge von jeder Art Licht, welche überhaupt in das Auge dringt, über die ganze Netzhaut ausgebreitet. Solches unregelmäßig zerstreute Licht ist allerdings von außerordentlich geringer Lichtstärke, wenn man es mit dem regelmäßig gebrochenen oder reflektierten Lichte vergleicht. Doch wird es merklich, wenn man sehr lichtschwache Teile des Spektrums zu untersuchen hat. Es ist z. B. der Grund, warum man bei den gewöhnlichen Einrichtungen der Spektralversuche das äußerste Rot der Linie *A* und das Ultraviolett nicht wahrnimmt, und es macht sich auch sehr bemerklich, wenn man einzelne Stellen des Spektrums durch farbige Gläser oder Flüssigkeiten sehr abschwächt, dann kann der Farbenton solcher Stellen durch das diffus im Gesichtsfelde verbreitete schwache Licht sehr beträchtlich geändert werden.

Diese Schwierigkeiten lassen sich bei Untersuchungen über lichtschwache Teile des Spektrums nur dadurch vollständig überwinden, daß man durch den Spalt nur noch solches Licht in größerer Stärke auf das Prisma und Fernrohr fallen läßt, als gerade untersucht werden soll, und alles Licht anderer Art, soweit man kann, ausschließt. In einzelnen Fällen kann man dies einfach dadurch erreichen, daß man farbige Gläser zwischen die Lichtquelle und den Spalt einschaltet, z. B. rotes Glas, um die

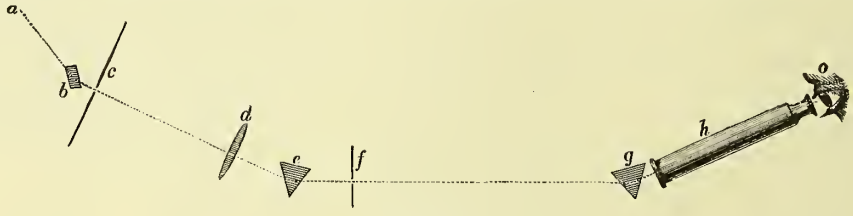



Fig. 13.

Grenze des äußersten Rot im Spektrum sichtbar zu machen. Allgemeiner und vollständiger erreicht man den Zweck, wenn man hintereinander zwei Spalten und zwei Prismen aufstellt, in der Weise, daß durch den zweiten Spalt, dessen Bild das Spektrum geben soll, nur noch Licht der betreffenden Art hindurchgeht. Das Schema dieser Anordnung ist in Fig. 13 gegeben. Der einfallende Lichtstrahl *a b* trifft bei *b* auf den Spiegel des Heliostaten, geht durch einen Spalt in dem Schirme *c*, der im allgemeinen nicht sehr eng zu sein braucht, fällt dann auf die Linse *d* und das Prisma *e* auf den Schirm *f*, welcher so weit von der Linse absteht, daß die vom Spalte *c* ausgegangenen Strahlen auf ihm vereinigt werden, so daß auf ihm ein in ein Spektrum ausgezogenes Bild dieses Spalts entsteht. Dieses erste Spektrum braucht im allgemeinen nicht rein zu sein. Es muß vielmehr, so oft man einen etwas breiteren Teil des Spektrums untersuchen will, wie z. B. das Ultraviolett, so unrein sein, daß es eine Stelle gibt, wo sich sämtliche ultraviolette Strahlen decken. Um dies nach Belieben zu regulieren, ist es eben vorteilhafter, das Prisma zwischen Linse und Schirm zu stellen. Nähert man den Schirm dem Prisma, und entfernt die Linse um ein entsprechendes Stück, so wird das Spektrum kürzer und unreiner. Entfernt man den Schirm von dem Prisma, so wird es länger und reiner. In dem Schirme *f* befindet sich zwischen Gravesandeschen Schneiden ein feiner Spalt, den man so stellt, daß gerade die Farbe des Spektrums, welche untersucht werden soll, sich auf ihm projiziert. Will man z. B. das Ultraviolett untersuchen, so rückt man den Spalt so, daß er neben dem äußersten Rande des sichtbaren Violett steht. Unter diesen Umständen geht nun regelmäßig gebrochenes Ultraviolett, so lichtstark als es eben die Sonne liefert, durch den Spalt, und gleichzeitig etwas weißes von der Substanz des Prismas und der Linse diffus zerstreutes oder an ihren Flächen mehrfach reflektiertes Licht. Das letztere

ist allerdings außerordentlich viel schwächer, als das regelmäßig gebrochene Sonnenlicht im Spektrum, aber doch stark genug, um auf dem Schirme *f* das Ultraviolett ganz zu verdecken. Das durch den Spalt *f* gegangene Licht fällt nun auf das zweite Prisma *g* und dahinter entweder unmittelbar oder durch ein Fernrohr in das Auge des Beobachters, wenn man nicht vorzieht, statt des Fernrohrs eine Linse aufzustellen, und in ihrem Brennpunkte auf einem Schirme ein objektives Bild des Spektrums aufzufangen. Da durch den Spalt *f* noch etwas weißes Licht gegangen ist, bekommt man auch hier ein vollständiges Spektrum, aber alle seine Teile sind sehr lichtschwach mit Ausnahme des Ultraviolett, oder welche andere Farbe des im ersten Prisma regelmäßig gebrochenen Lichts man eben durch den Spalt *f* hat gehen lassen. Wenn auch nun im zweiten Prisma *g* und in den Linsen des Fernrohrs *h* oder im Auge des Beobachters *o* Licht unregelmäßig zerstreut wird, so ist alles andere Licht außer dem Ultraviolett jetzt schon zu schwach, als daß die geringen zerstreuten Teile desselben noch sollten wahrgenommen werden können. In der Tat gelingt es unter diesen Umständen das Spektrum auch im Fernrohr auf ganz tiefschwarzem Grunde projiziert zu sehen, dessen Schwärze nicht mehr zu unterscheiden ist von der der Okularblendung, so daß sich deren Rand nur da noch abzeichnet, wo er das Spektrum bedeckt. Erst wenn man diese tiefe Schwärze des Grundes erreicht hat, kann man sicher sein, reines einfarbiges Licht vor sich zu haben. Unter diesen Umständen wird denn auch das Ultraviolett des Sonnenlichts dem Auge direkt sichtbar, und nur bei solchen Vorsichtsmaßregeln gelingt es, die Unveränderlichkeit der Farbe des homogenen Lichts, wenn es durch farbige Gläser hindurchgeht, nachzuweisen. Solange dem Spektrum noch eine kleine Menge diffusen weißen Lichts beigemischt ist, verändern farbige Medien, welche die betreffende Farbe durch Absorption sehr schwächen, auch scheinbar ihren Farbenton. Ein blaues mit Kobalt gefärbtes Glas zum Beispiel löscht das Gelb des Spektrums fast ganz aus, läßt aber die blauen Strahlen des zerstreuten weißen Lichts ungeschwächt durchgehen, so daß diese, mit dem durch Absorption geschwächten Gelb sich mischend, eine weiße oder selbst blauweiße Mischfarbe an Stelle des Gelb geben, welche Mischfarbe aber nicht, wie D. Brewster glaubte, Licht von einem einzigen Grade der Brechbarkeit enthält, sondern deren Licht durch ein zweites Prisma wieder zerlegt werden kann in verschiedenfarbiges und verschieden brechbares Licht. Stellt man denselben Versuch dagegen an einem von diffusem Lichte vollständig befreiten Spektrum an, so bleibt das homogene Gelb auch bei den äußersten Graden der Schwächung durch ein blaues Glas rein gelb. Wir dürfen deshalb auch nicht, wie Brewster es getan hat, aus diesem und ähnlichen Versuchen schließen, daß das Licht gleicher Brechbarkeit und Wellenlänge noch wieder aus drei verschiedenen Lichtarten von roter, gelber und blauer Farbe zusammengesetzt sei, welche verschiedenfarbigen Lichter nur in verschiedenen Teilen des Spektrums verschieden gemischt seien, und durch die Absorption in farbigen Medien voneinander getrennt werden könnten. Die Versuche, auf welche er diese Resultate gründet, beruhen teils auf dem erwähnten Umstande, zum Teil auf Kontrastwirkungen, zum Teil auf der schon oben erwähnten Abhängigkeit des Farbentons von der Intensität des Lichts.[1]

Nach der beschriebenen und in Fig. 13 schematisch dargestellten Methode kann man das überviolette Spektrum in ganzer Länge dem Auge direkt sichtbar machen, ohne eine fluoreszierende Substanz anzuwenden, doch müssen für das äußerste Ultraviolett die Prismen und Linsen alle aus Bergkristall gefertigt sein, nicht aus Glas, weil letzteres die äußersten ultravioletten Strahlen des Sonnenspektrums merklich absorbiert. Man sieht dann auch sehr deutlich die außerordentlich große Zahl dunkler Linien, welche dieser Teil des Spektrums enthält. Ich glaubte die Helligkeit des im Fernrohre gesehenen ultravioletten Spektrums verstärken zu können, wenn ich in die Okularblendung eine dünne Schicht Chininlösung zwischen zwei Quarzplatten einschaltete.

[1] Helmholtz über D. Brewsters neue Analyse des Sonnenspektrums. Pogg. Ann. LXXXVI. 501. — Bernard, *Ann. de Chim.* XXXV. 385—438.

Dann wird das Spektrum gerade auf die Chininfläche projiziert und erregt deren Fluoreszenz. Die fluoreszierende Chininfläche wird durch die Okularlinse betrachtet, und es erscheint nun dem Beobachter ein ähnliches Bild, wie es ohne Chininschicht erscheint, nur ist das Bild dann nicht aus ultraviolettem Lichte, sondern aus weißblauem Lichte mittlerer Brechbarkeit gebildet. Die Helligkeit dieses Bildes war aber in meinem Fernrohr nicht, wie ich erwartet hatte, größer als die des direkt gesehenen ultravioletten Lichts, sondern fast gleich, eher kleiner, und die Linien waren wegen der Dicke der Chininschicht undeutlicher. Der Grund davon ist darin zu suchen, daß durch das Objektivglas des Fernrohrs nur ein schmaler Lichtkegel in das Instrument eindringt, alles oder fast alles Licht dieses Kegels aber auch in das Auge fällt und die Netzhaut beleuchtet, wenn keine Chininschicht eingeschaltet ist. Wenn aber das ultraviolette Licht auf eine Chininlösung fällt, so verbreitet es sich von dieser aus nach allen Richtungen des Raums hin, und nur ein sehr kleiner Teil des vom Chinin ausgehenden Lichts trifft das Auge des Beobachters, daher dessen Netzhaut trotz der großen Steigerung der Helligkeit des fluoreszierenden Lichts nicht stärker beleuchtet wird. Auf diese Erfahrung ist die oben gegebene Angabe über das Verhältnis der Helligkeit des unveränderten ultravioletten Lichts und der dadurch auf Chinin erregten Fluoreszenz gegründet.

Ist $a$ die Apertur des Objektivglases oder des davor stehenden Prisma, wenn letzteres die Grundfläche des Lichtkegels begrenzt, und $r$ der Abstand des Bildes, und denkt man sich ferner um den Ort des Bildes als Mittelpunkt eine Kugelfläche vom Radius $r$ geschlagen, so würde das ultraviolette Licht, wenn es sich ungestört fortpflanzte, von der Kugelfläche nur eine Fläche von der Größe $a$ beleuchten. Wäre das Bild aber auf Chinin gefallen, so würde es die ganze Kugelfläche, deren Größe $4\,\pi\,r^2$ ist, gleichmäßig beleuchten. Im ersteren Falle ist das Licht also konzentrierter in dem Verhältnisse $\frac{4\,\pi\,r^2}{a}$ im Vergleich zum letzteren Falle, und wenn ein Auge, dessen Pupille ganz in das Strahlenbündel beider Lichtarten eingetaucht ist, sie beide gleich hell sieht, so folgt, daß bei gleicher Verbreitungsweise das Fluoreszenzlicht im Verhältnis $\frac{4\,\pi\,r^2}{a}$ heller sein würde. Letzterer Bruch war bei meinem Apparat, nach Anstellung der nötigen Korrektionen, gleich 1200. Daraus folgt also, daß das ultraviolette Licht auf einem Chininschirme aufgefangen etwa 1200mal heller erscheinen muß, als wenn es auf einer nicht fluoreszierenden matten weißen Fläche von Porzellan aufgefangen wird.

Die Fluoreszenz der stark fluoreszierenden Substanzen kann man in jedem Spektrum leicht beobachten und erkennen. Handelt es sich aber darum, die schwächsten Grade der Fluoreszenz wahrzunehmen, wie z. B. die der Netzhaut, so kann man den in Fig. 12 dargestellten Apparat mit folgenden Abänderungen benutzen. Man macht das erste Spektrum sehr unrein, indem man den ersten Spalt bei $c$ ganz wegnimmt und das Prisma $e$ nahe an den Schirm $f$ heranrückt; dabei läßt man die Grenze des Violett auf dem Schirme $f$ gerade dessen weit geöffneten Spalt berühren. Von dem Fernrohr $h$ läßt man nur die Objektivlinse stehen, und bringt dann in deren Brennpunkt, wo das ultraviolette Licht am meisten konzentriert und von allem weißen Lichte gereinigt ist, die fraglichen Substanzen. Es gibt kaum irgendwelche Stoffe, an denen man unter solchen Umständen nicht Spuren von Fluoreszenz wahrnähme. Da bei diesen Versuchen auch das unveränderte ultraviolette Licht noch sichtbar sein kann, so blickt man nach der untersuchten Substanz entweder durch ein gelbes oder grünes Glas (am besten Uranglas), welches das Ultraviolett auslöscht, oder durch ein schwach brechendes Prisma, welches das Ultraviolett von den Farben mittlerer Brechbarkeit trennt. Die Fluoreszenz der Linse und der Hornhaut des Auges ist leicht nachzuweisen, wenn man ein lebendes Auge in den Fokus ultravioletten Lichts bringt. Die Linse wird so stark beleuchtet, daß man noch viel besser als bei der Beleuchtung mit gewöhnlichem Licht (S. 16, Bd. I) ihre Lage dicht hinter der Iris und

ihre Form erkennen kann. Die fluoreszierende Linse zerstreut natürlich eine große Menge blauweißen Lichts gleichmäßig über den ganzen Hintergrund des Auges. Wenn man dagegen ein ultraviolettes Spektrum betrachtet, sieht man dies sehr scharf und fein gezeichnet. Daher darf man nicht daran denken, daß das überviolette Licht dem Auge etwa wegen der Fluoreszenz der Linse sichtbar würde. Letztere könnte nie ein scharf begrenztes Netzhautbild geben.

In derselben Weise wie das Ultraviolett untersucht man das äußerste Rot.

Die Methoden der Wellenmessungen gehören in die physikalische Optik, auf welche ich in dieser Beziehung verweisen muß.

Vor Newtons Zeit bestand die Farbentheorie meist aus unbestimmten Hypothesen. Da das aus dem gesamten weißen Lichte ausgeschiedene farbige Licht als Teil notwendig immer geringere Intensität hat als das Ganze, so betrachtete man in älterer Zeit diese Verminderung der Lichtintensität als das Wesentliche der Farbe, und die Meinung des Aristoteles, Farbe entstehe durch eine Mischung von Weiß und Schwarz, zählte viele Anhänger. Er selbst ist unschlüssig, ob er diese Vermischung als eine wahre Verschmelzung oder mehr als ein atomistisches Über- oder Nebeneinanderliegen denken soll. Das Dunkle, meint er, müsse durch die Reflexion an den Körpern entstehen, da jede Reflexion das Licht schwäche. Es ist dies die durchgängige Ansicht bis zum Anfange der neueren Zeit z. B. bei Maurolycus, Joh. Fleischer, de Dominis, Funk, Nuguet (siehe Goethes Geschichte der Farbenlehre), und in neuester Zeit hat Goethe sie noch einmal in seiner Farbenlehre zu verteidigen gesucht. Dieser geht eigentlich nicht darauf aus, eine Erklärung der Farbenerscheinungen im physikalischen Sinne zu geben — als solche genommen, würden seine Sätze sinnlos sein —, sondern er sucht nur die Bedingungen allgemein aufzustellen, unter denen Farben entstehen; diese sollen sich in einem „Urphänomen“ deutlich darlegen. Als solches betrachtet er die Farbe trüber Medien. Eine große Zahl solcher Medien machen durchgehendes Licht rot, auffallendes läßt sie vor dunklem Hintergrunde blau erscheinen. Während nun Goethe im allgemeinen der Ansicht von Aristoteles folgt, daß das Licht verdunkelt, oder mit Dunkel gemischt werden müsse, um Farben zu erzeugen, glaubt er in den Erscheinungen der trüben Medien die besondere Art der Verdunkelung gefunden zu haben, welche nicht Grau, sondern Farben erzeuge. Was dadurch am Lichte selbst geändert werde, erklärt er nie. Er spricht wohl davon, daß das trübe Medium dem Lichte etwas Körperliches, Schattiges gebe, wie es zur Erzeugung der Farbe nötig sei. Wie er sich dies denkt, deutet er nicht näher an. Unmöglich kann er meinen, daß von den Körpern etwas Körperliches mit dem Lichte davonfliege; und einen anderen Sinn könnte es doch kaum haben, wenn es eine physikalische Erklärung sein sollte.

Goethe betrachtet ferner alle durchsichtigen Körper als schwach trübe, so auch das Prisma, und nimmt an, daß das Prisma dem Bilde, welches es dem Beobachter zeigt, von seiner Trübung etwas mitteile. Er scheint dabei gemeint zu haben, daß das Prisma nie ganz scharfe Bilder entwirft, sondern undeutliche, verwaschene, denn er reiht sie in der Farbenlehre an die Nebenbilder an, welche parallele Glasplatten und Kristalle von Kalkspat zeigen. Verwaschen sind die Bilder des Prismas allerdings im zusammengesetzten Lichte, vollkommen scharf im einfachen, welches Goethe, wie es scheint, aber nie vor sich gehabt hat, da er die zusammengesetzten Methoden, welche es liefern können, einzuschlagen verschmähte. Betrachte man, meint er, durch das Prisma eine helle Fläche auf dunklem Grunde, so werde das Bild vom Prisma verschoben und getrübt. Der vorangehende Rand desselben werde über den dunklen Grund hinübergeschoben, und erscheine als helles Trübes vor Dunklem blau. Der hinterher folgende Rand der hellen Fläche werde aber von dem vorgeschobenen trüben Bilde des darnach folgenden schwarzen Grundes überdeckt und erscheine als ein Helles hinter einem dunkeln Trüben gelbrot. Warum der vorangehende Rand vor dem Grunde, der nachbleibende hinter demselben erscheine, und nicht umgekehrt, erklärt er nicht. Auch diese Darstellung der Sache, wenn man sie als physikalische Erklärung fassen wollte, wäre sinnlos. Denn das prismatische Bild, welches in diesen Fällen gesehen wird,

ist ein potentielles, also nur der geometrische Ort, in welchem rückwärts verlängert, sich die Lichtstrahlen, welche in das Auge des Beobachters fallen, schneiden würden, und kann also nicht die physikalischen Wirkungen eines trüben Mittels ausüben. Es sind diese Goetheschen Darstellungen eben nicht als physikalische Erklärungen, sondern nur als bildliche Versinnlichungen des Vorgangs aufzufassen. Er geht überhaupt in seinen naturwissenschaftlichen Arbeiten darauf aus, das Gebiet der sinnlichen Anschauung nicht zu verlassen, jede physikalische Erklärung muß aber zu den Kräften aufsteigen, und die können natürlich nie Objekt der sinnlichen Anschauung werden, sondern nur Objekte des begreifenden Verstandes.

Die Versuche, welche Goethe in seiner Farbenlehre angibt, sind genau beobachtet und lebhaft beschrieben, über ihre Richtigkeit ist kein Streit. Die entscheidenden Versuche mit möglichst gereinigtem einfachen Lichte, auf welche Newtons Theorie gegründet ist, scheint er nie nachgemacht oder gesehen zu haben. Seine übermäßig heftige Polemik gegen Newton gründet sich mehr darauf, daß dessen Fundamentalhypothesen ihm absurd erscheinen, als daß er etwas Erhebliches gegen seine Versuche oder Schlußfolgerungen einzuwenden hätte. Der Grund aber, weshalb ihm Newtons Annahme, das weiße Licht sei aus vielfarbigem zusammengesetzt, so absurd erschien, liegt wieder in seinem künstlerischen Standpunkte, der ihn nötigte, alle Schönheit und Wahrheit unmittelbar in der sinnlichen Anschauung ausgedrückt zu suchen. Die Physiologie der Sinnesempfindungen war damals noch unentwickelt, die Zusammensetzung des Weiß, welche Newton behauptete, war der erste entschiedene empirische Schritt zu der Erkenntnis der nur subjektiven Bedeutung der Sinnesempfindungen. Und Goethe hatte daher ein richtiges Vorgefühl, wenn er diesem ersten Schritte heftig opponierte, welcher den „schönen Schein" der Sinnesempfindungen zu zerstören drohte.

Das große Aufsehen, welches Goethes Farbenlehre in Deutschland machte, beruhte zum Teil darauf, daß das große Publikum, ungeübt in der Strenge wissenschaftlicher Untersuchungen, natürlich mehr geneigt war, einer künstlerisch anschaulichen Darstellung des Gegenstandes zu folgen, als mathematisch physikalischen Abstraktionen. Da bemächtigte sich auch die Hegelsche Naturphilosophie der Goetheschen Farbenlehre für ihre Zwecke. Hegel wollte ähnlich wie Goethe in den Naturerscheinungen den unmittelbaren Ausdruck gewisser Ideen oder gewisser Stufen des dialektisch sich entwickelnden Denkens sehen, darin liegt seine Verwandtschaft mit Goethe und sein prinzipieller Gegensatz gegen die theoretische Physik.

Descartes machte bei Gelegenheit seiner Untersuchungen über die Theorie des Regenbogens eine neue Hypothese, indem er annahm, die Teilchen, aus denen das Licht bestehe, hätten nicht bloß eine geradlinige Bewegung, sondern rotierten auch noch um ihre Achse und von der Rotationsgeschwindigkeit hänge die Farbe ab. Die Rotation und somit auch die Farbe könne übrigens geändert werden durch Einwirkung durchsichtiger Körper. Ähnliche mechanische Vorstellungen bildeten sich Hooke und de la Hire; letzterer ließ die Farben von der Stärke abhängen, mit der das Licht auf den Sehnerven trifft.

Endlich bewies Newton die Zusammensetzung des weißen Lichts, und schied einfaches Licht aus, zeigte, daß dies farbig erscheine, daß dessen Farbe durch Absorption und Brechung nicht weiter verändert werden könne, daß verschiedenfarbiges Licht verschiedene Brechbarkeit besitze, und daß die Farben der natürlichen Körper durch verschiedene Absorption und Reflexion der verschiedenartigen Lichtstrahlen entständen. Übrigens erklärt er die Farbe der Lichtstrahlen schon durchaus aus ihrer Wirkung auf die Netzhaut; nicht die Lichtstrahlen selbst seien rot, sondern sie bewirkten die Empfindung des Rot. Er folgte der Emanationstheorie des Lichts; Hypothesen über den physikalischen Unterschied der verschiedenfarbigen Lichtarten machte er nicht.

Ziemlich gleichzeitig, 1690, hatte Huyghens die Hypothese aufgestellt, daß das Licht in Undulationen eines feinen elastischen Mediums bestehe; diese Hypothese brachte Euler mit Newtons Entdeckungen in Verbindung, und folgerte daraus, daß die ein-

fachen Farben sich durch ihre Schwingungsdauer unterschieden; aber freilich nahm er zuerst an, die roten machten die schnelleren Schwingungen, und fand erst später das Richtige; Hartley stützte diese Ansicht richtig auf die Farben dünner Blättchen. Eine bestimmte Entscheidung darüber wurde erst möglich, als Th. Young und Fresnel das Prinzip der Interferenz entdeckt hatten, und durch diese Entdeckung gewann auch erst die Undulationstheorie eine allgemeine Anerkennung.

Gegen Newtons Folgerung, daß die Farbe der Strahlen von der Brechbarkeit abhänge, Strahlen von einem konstanten Grade der Brechbarkeit übrigens homogen und von unveränderlicher Farbe seien, trat D. Brewster auf. Er meinte beobachtet zu haben, daß homogenes Licht, wenn es durch farbige Mittel gehe, seine Farbe ändern könne, und meinte auf diese Weise aus homogenem Lichte Weiß ausscheiden zu können. Er schloß daraus, daß es dreierlei verschiedene Arten Licht, den drei sogenannten Grundfarben entsprechend, gebe, rotes, gelbes und blaues, und daß jede dieser Lichtarten Strahlen von jedem Grade der Brechbarkeit innerhalb der Grenzen des Spektrums liefere, aber so, daß das rote Licht am roten Ende, das Gelb in der Mitte, das Blau am blauen Ende überwiege. Farbige Mittel sollten die verschiedenfarbigen Lichter gleicher Brechbarkeit in verschiedener Stärke absorbieren und dadurch voneinander trennen können. Gegen Brewster opponierten Airy, Draper, Melloni, Helmholtz, F. Bernard. Außer einigen Fällen, wo durch Kontrastwirkungen der nebenstehenden lebhafteren Farben der Farbenton der durch farbige Gläser sehr geschwächten Strahlen verändert erschien, und einigen Fällen, wo die oben erwähnte Änderung der Farbe mit der Lichtstärke in Betracht kam, rühren die meisten von Brewster geltend gemachten Beobachtungen von dem oben schon erwähnten Umstande her, daß kleine Mengen weißen Lichts durch mehrfache Reflexion an den Oberflächen oder durch diffuse Reflexion in der Substanz der Prismen und der Augenmedien über das Gesichtsfeld zerstreut waren.

Die Vergleichung der einfachen Farben mit den Tönen wurde von Newton zuerst angestellt; er verglich aber nur die Breite der Farbenstreifen im Spektrum von Glasprismen mit den musikalischen Intervallen der phrygischen Tonleiter. Schon Lambert bemerkte, daß in dieser Abteilung viel Willkürliches wäre, da keine festen Grenzen im Spektrum beständen. Nur so viel sei richtig, daß die Farbenstreifen vom Rot gegen das Violett dergestalt in der Breite anwachsen, daß man nicht sowohl die Summe ihrer Breiten, als die Summe ihrer Verhältnisse zum Maße nehmen muß, so wie es in der Musik mit den Tönen geschieht. Ähnlich urteilte de Mairan. Indessen suchte doch Pater Castel auf diese Vergleichung ein Farbenklavier zu gründen, welches durch eine gewisse Farbenfolge ähnliche Wirkungen, wie die Musik, hervorbringen sollte. Hartley, welcher die Unterschiede der Farben auf Schwingungen verschiedener Länge zurückzuführen suchte, gewann dadurch die Möglichkeit einer direkteren Vergleichung mit den Schwingungszahlen der Töne. In demselben Sinne bemerkte auch Th. Young, daß der ganze Umfang des damals bekannten Teils des Spektrums einer großen Sexte gleich kommt, daß Rot, Gelb, Blau etwa den Verhältnissen 8 : 7 : 6 entsprechen. Nachdem nun in neuerer Zeit die Größe der Wellenlängen für die verschiedenen Farben namentlich durch Fraunhofers Messungen bekannt geworden ist, hat Drobisch wieder versucht, die Vergleichung der Farbenskala mit der Tonskala herzustellen. Er vergleicht wie Newton die Breite der Farben mit den Intervallen der sogenannten phrygischen Tonart $1 : \frac{9}{8} : \frac{6}{5} : \frac{4}{3} : \frac{3}{2} : \frac{5}{3} : \frac{16}{9} : 2$. Da aber das Verhältnis der Wellenlängen für die Grenzen des gewöhnlich sichtbaren Spektrums, wie es Fraunhofer ausgemessen hat, kleiner ist als eine Oktave, so erhebt er alle jene Verhältniszahlen in eine Potenz, als deren Exponent er erst $\frac{2}{3}$, später $\frac{6}{7}$ wählte. Dadurch erhält er folgende Tafel, in der die Wellenlängen in Millionteilen eines Millimeters ausgedrückt sind:

| | | |
|---|---|---|
| Rot | 688,1 | Linie $B = 687{,}8$ |
| | 622,0 | $C = 655{,}6$ |
| Orange | | $D = 588{,}8$ |
| | 588,6 | |
| Gelb | | |
| | 537,7 | |
| Grün | | $E = 526{,}5$ |
| | 486,1 | |
| Blau | | $F = 485{,}6$ |
| | 446,2 | |
| Indigo | | $G = 429{,}6$ |
| | 420,1 | |
| Violett | | $H = 396{,}3$ |
| | 379,8 | |

Die Grenzen der Farben unter sich stimmen in diesem Schema ziemlich gut mit den natürlichen überein; zweckmäßig möchte es vielleicht sein, statt der kleinen Terz die große zu nehmen, also die ganze Vergleichung auf die Durtonleiter zu bauen, wie Drobisch auch selbst bemerkt; dann fiele die Grenze des Orange und Gelb, die im obigen Schema im Goldgelb bei *D* liegt, dem reinen Gelb näher. Aber wenn auch insofern die Vergleichung stimmt, so vergesse man nicht, daß der ganze Sinn der Vergleichung zwischen Schall- und Lichtwellen schon durch die Erhebung der musikalischen Verhältnisse in eine gebrochene Potenz verloren gegangen ist, daß die Enden des Spektrums willkürlich abgebrochen sind, da in der Tat die schwach wirkenden Endfarben des Spektrums an beiden Seiten viel weiter reichen, daß die Newtonsche Abteilung der 7 Hauptfarben schon willkürlich gemacht und nur der musikalischen Analogien wegen so gewählt ist. Goldgelb verdiente mindestens ebenso gut seinen Platz zwischen Gelb und Orange, wie Indigo zwischen Blau und Violett, ebenso Gelbgrün und Blaugrün, und daß endlich Grenzen der Farben im Spektrum wirklich nicht existieren, sondern von uns nur der Nomenklatur zu Liebe willkürlich gezogen werden. Ich selbst glaube deshalb, daß man diese Vergleichung aufgeben müsse.

Endlich hat in neuerer Zeit auch Unger versucht, auf die Vergleichung der Lichtwellenverhältnisse mit den musikalischen Intervallen eine Theorie der ästhetischen Farbenharmonie zu gründen. In seinen faktischen Angaben über die harmonierenden Farben scheint viel Wahres zu sein, was großenteils aus Kunstwerken richtig abstrahiert ist, aber seine Theorie, die Vergleichung mit den musikalischen Verhältnissen, ist etwas gewaltsam erzwungen. Auf seiner chromharmonischen Scheibe hat er Farbentöne zusammengestellt, die den 12 halben Tönen der Oktave entsprechen sollen, zu welchem Zweck er aber zwischen Violett und Rot purpurrote Farben einschaltet, die als einfache Farben nicht existieren. In diese purpurnen Töne läßt er die Fraunhoferschen Linien *G*, *H*, *A* fallen, während die beiden ersteren das reine Violett begrenzen, die letztere dem reinen Rot angehört. Die einfachen Farben, welche über das Violett hinausliegen, sind in Wahrheit blau, nicht purpurrot. Die vollkommenste Harmonie soll dem Durakkord entsprechen. Dieser liefert auf seiner Scheibe z. B. die viel gesehene Zusammenstellung der italienischen Maler: Rot, Grün, Violett. Aber der richtige Durakkord, wenn man Grün als große Terz nimmt, wäre Rot, Grün, Indigblau. Den antiken Malern fehlt ein gutes Rot, sie brauchen Mennige, Orange, dafür und bilden den Akkord: Orange, Grünblau, rötlich Violett. Die Mollakkorde geben einen sanfteren und trüberen Eindruck, die verminderten und übermäßigen Dreiklänge geben einen pikanten, weniger künstlerisch reinen Eindruck. Ich glaube, daß man für die richtige Beobachtung der Farbenwirkung, die sich bei Unger finden, statt der erzwungenen musikalischen Analogien, einen anderen Grund suchen muß. Die

gesättigten Farben bilden in der Tat eine in sich zurücklaufende Reihe, wenn wir die Lücke zwischen den Enden des Spektrums durch die purpurnen Töne ergänzen, und dem Auge scheint es angenehm zu sein, wenn ihm drei Farben geboten werden, die ungefähr gleichweit in der Reihe auseinanderliegen. Die oben erwähnte berühmte Zusammenstellung der italienischen Maler: Rot, Grün, Violett, welche keinem richtigen Durakkorde entspricht, entspricht in Wirklichkeit den drei Grundfarben von Th. Young, und darin kann der Grund ihrer ästhetischen Wirkung liegen. Andere Farben, in richtiger Distanz voneinander gewählt, machen einen ähnlichen befriedigenden Eindruck. Wo zwei derselben sich zu sehr nähern, wird der Eindruck minder rein. Das ist vielleicht die Bedeutung von Ungers Beobachtungen; übrigens kann offenbar bei der sogenannten Farbenharmonie von einer so strengen Bestimmung wie bei den musikalischen Intervallen nicht die Rede sein kann.

---

384—322. v. Ch. Aristoteles, De coloribus.
1571. Joh. Fleischer, De iridibus doctrina Aristotelis et Vitellionis. Vitembergae 1571. p. 86.
1583. Jo. Bapt. Porta, De refractione libri novem. Neapoli 1583. lib. IX.
1590. Bernardini Telesii, Opera. Venetiis 1590. De Iride et coloribus.
1611. M. Antonii de Dominis, De radiis visus et lucis in vitris perspectivis et Iride. Venetiis 1611.
1613. Maurolycus, De lumine et umbra. Lugd. 1613. p. 57.
1637. Cartesius, De meteoris. Kap. VIII.
1648. Jo. Marcus Marci, Thaumantias, liber de arcu coelesti, deque colorum apparentium natura, ortu et caussis. Pragae 1648.
1665. R. Hooke, Micrographia. London 1665. p. 64.
1675. *I. Newton in *Philosophical Transact.* 1675. (Erste Notizen über seine Ansicht) — Optics. London 1704. (Vollständige Ausarbeitung seiner optischen Entdeckungen) — Lectiones opticae.
1711. De la Hire, *Mém. de l'Acad. des Sc.* 1711. p. 100.
1746. Euler. Nova theoria lucis colorum in den *Opusculis varii argumenti.* Berol. 1746. p. 169—244.
1752. Euler in *Mém. de l'Acad. de Prusse* 1752. p. 271. *Essai d'une explication des couleurs.*

Gegen Newton.

1727. Rizetti, Specimen physico math. de luminis affectionibus. Ven. 1727.
1737. Leblond, *Harmony of colouring.* London.
1740. Castel, *L'optique des couleurs.* Paris.
1750. Gautier, *Chroagenesic ou génération des couleurs contre le système de Newton.* Paris. 2 vol. 8.
1752. Gautier, *Observations sur l'histoire naturelle, sur la physique et la peinture.* Paris.
1754. Cominale, Anti-Newtonianismus. 4. Napoli.
1780. Marat, *Découvertes sur la lumière.* Paris. 8.
1784. Marat, *Notions élémentaires d'optique.* Paris. 8.
1791. 92. Goethe, Beiträge zur Optik. Weimar.
1794. Wünsch, Kosmologische Unterhaltungen.
1810. Goethe, Zur Farbenlehre. Entoptische Farben, zur Naturwissenschaft 126—190.
1823. Bourgeois, *Manuel d'optique expérimentale.* Paris. 2 vol. 12.

Über Newton und Goethe.

1811. Seebeck, Von den Farben und dem Verhalten derselben gegeneinander. Schweigger's Journal 1811. p. 1.
Mollweide, Demonstratio propositionis quae theoriae colorum Newtoni fundamenti loco est. Lipsiae 1811.
Pfaff, Über die farbigen Säume der Nebenbilder des Doppelspats mit besonderer

1811. Berücksichtigung von Goethes Erklärung der Farbenentstehung durch Nebenbilder. Schweiggers Jahrbücher VI. 177.
Poselger in Gilberts Annalen XXXVII. 135.
1817. Werneburg, Merkwürdige Phänomene durch verschiedene Prismen zur richtigen Würdigung Newtonscher und Goethescher Farbenlehre. Nürnberg 1817. 4.
1827. Brandes, Art. Farbe in Gehlers neuem physik. Wörterbuch.
1833. Reuther, Über Licht und Farbe. Kassel 1833.
Steffens, Über die Bedeutung der Farben in der Natur. Schriften alt und neu.
1835. Helwag, Newtons Farbenlehre aus ihren richtigen Prinzipien berichtigt. Lübeck 1835.
Moser, Über Goethes Farbenlehre. Abh. der Königsberger deutschen Gesellsch.
1853. Helmholtz, Über Goethes naturwissenschaftliche Arbeiten; in Kieler Monatsschrift für Wissenschaft und Lit. 1853. Mai S. 383.
1857. Grävell, Goethe im Recht gegen Newton. Berlin 1857. — Rezensiert von Q. Icilius in Kekules kritischer Zeitschr. für Chemie, Physik und Math. Erlangen 1858. 2. und 3. Heft.
1859. Grävell, Über Licht und Farben. Berlin (Antwort auf die Rezension).

### Eigentümliche Theorien.

1816. Reade, *Experimental outlines for a new theory of colours, light and vision.* London 8.
1824. Hoppe, Versuch einer ganz neuen Theorie der Entstehung sämtlicher Farben. Breslau. 8.
1828. Röttger, Erklärung des Lichts und der Dunkelheit. Halle.
1830. Schäffer, Versuch einer Beantwortung der von der Akad. zu Petersburg aufgegebenen Preisfrage über das Licht. Bremen. 8.
Walter Crumm, *An experimental inquiry into the number and properties of the primary colours, and the source of colours in the prism.* London 1830.
1831. D. Brewster, *Description of a monochromatic Lamp with Remarks on the absorption of the Prismatic Rays. Edinb. Transact.* IX. P. II. p. 433.
Derselbe, *On a new Analysis of Solar Light. Edinb. Transact.* XII. P. I. 123. Poggendorffs Ann. XXIII. 435.
1834. Exley, *Physical optics or the phenomena of optics.* London.

### Über Brewsters Theorie.

1847. Airy in *Philos. Magax.* (3.) XXX. 73. Poggendorffs Ann. LXXI. 393.
Brewster, *Reply.* Ebenda XXX. 153.
Draper in Silliman Journ. IV. 388. *Phil. Magax.* XXX. 345.
Brewster, *Phil. Magax.* XXX. 461.
Melloni, *Bibl. univ. de Genève.* Août 1847. *Phil. Magax.* XXXII. 262. Poggendorffs Ann. LXXV. 62.
Brewster, *Phil. Magax.* XXXII. 489.
1852. Helmholtz, Über Herr D. Brewsters neue Analyse des Sonnenlichts. Poggendorffs Ann. LXXXVI. 501. — *Phil. Magax.* (4.) IV.
F. Bernard, *Thèse sur l'absorption de la lumière par les milieux non crystallisés. Ann. de Chim.* (3.) XXXV. 385—438.
1855. D. Brewster, *On the triple spectrum.* Athen 1855, p. 1156. Inst. 1855, p. 381. *Report of Brit. Assoc.* 1855. 2. p. 7—9.

### Grenzen der Empfindlichkeit.

1845. 46. Brücke in Müllers Archiv für Anat. und Physiol. 1845. S. 262. 1846. S. 379. Poggendorffs Ann. LXV. 593. LXIX. 549.
1852. Cima, *Sul potere degli umori dell' occhio a trasmettere il calorico raggiante.* Torino.
1853. Donders, In Onderzoekingen gedaan in het physiol. Laborat. van de Utrechtsche Hoogeschool. Jaar VI. p. I. Müllers Archiv 1853. S. 459.
1854. G. Kessler in Graefe Archiv für Ophthalmologie I. Abt. 1. S. 466.
1855. Helmholtz, Über die Empfindlichkeit der menschlichen Netzhaut für die brechbarsten Strahlen des Sonnenlichts. Poggendorffs Ann. XCIV. 205. *Ann. de Chim.* (3.) XLIV. 74. *Arch. d. sc. phys.* XXIX. 243.

Vergleichung mit den Tonintervallen.

1704. I. Newton, Optics. Lib. I. Pars 2. Prop. 3.
1725—35. L. B. Castel, *Clavecin oculaire* in *Journ. de Trevoux.*
1737. de Mairan in *Mém. de l'Acad. des Sc.* 1737. p. 61.
1772. Lambert, Farbenpyramide. Augsburg 1772. § 19.
1772 Hartley in Priestley Geschichte der Optik. S. 549.
1801. Th. Young in *Phil. Transact.* 1802. p. 38.
1852. Drobisch, Abhandl. d. sächsischen Gesellsch. der Wiss. Bd. II. Sitzungsberichte derselben. Novbr. 1852. Poggendorffs Ann. LXXXVIII. 519—526.
Unger in Poggendorffs Ann. LXXXVII. 121—128. C. R. XL. 239.
1854. Derselbe. *Disque chromharmonique.* Göttingue.
1855. Helmholtz in Sitzber. d. Akad. d. Wiss. zu Berlin 1855. S. 760 Inst. 1856. p. 222.
J. J. Oppel, Über das optische Analogon der musikalischen Tonarten. Jahresber. der Frankfurter Vers. 1854—55. p. 47—55.
E. Chevreul, *Remarques sur les harmonies des couleurs.* C. R. XL. 239—242; *Edinb. Journ.* (2.) I. 166—168.

## § 20. Die zusammengesetzten Farben.

Wir haben gesehen, daß homogenes Licht von verschiedener Brechbarkeit und Schwingungsdauer die Empfindung verschiedener Farben in unserem Sehnervenapparate hervorbringt. Wenn nun ein und dieselbe Stelle der Netzhaut gleichzeitig von Licht zweier oder mehrerer verschiedener Grade der Schwingungsdauer getroffen wird, so entstehen neue Arten von Farbenempfindungen, welche im allgemeinen von denen der einfachen Farben des Spektrums verschieden sind, und welche das Eigentümliche haben, daß aus der Empfindung der zusammengesetzten Farbe nicht erkannt werden kann, welche einfache Farben in ihr enthalten sind. Es läßt sich vielmehr im allgemeinen die Empfindung jeder beliebigen zusammengesetzten Farbe durch mehrere Arten der Zusammensetzung verschiedener Spektralfarben hervorbringen, ohne daß es auch dem geübtesten Sinnesorgane möglich wäre, ohne Hilfe physikalischer Instrumente zu ermitteln, welche einfache Farben in dem zusammengesetzten Lichte verborgen sind. Es unterscheidet sich dadurch das Auge in seiner Reaktion gegen die Ätherschwingungen wesentlich vom Ohre, welches, von Tonwellen verschiedener Schwingungsdauer getroffen, die einzelnen Töne zwar zu einer Gesamtempfindung eines Akkords verbindet, aber doch jeden einzelnen einzeln darin wahrnehmen kann, so daß zwei aus verschiedenen Tönen zusammengesetzte Akkorde dem Ohre niemals identisch erscheinen, wie es für das Auge verschiedene Aggregate zusammengesetzter Farben sein können.

Was hier gesagt ist, bezieht sich auf die unmittelbare Sinnesempfindung, und wird keineswegs umgestoßen durch die Erfahrung, das uns ein Akt des Urteils zuweilen die Zusammensetzung wenigstens der Hauptsache nach richtig erkennen läßt. Wer einige Erfahrung über die Resultate der Mischung farbigen Lichtes hat, glaubt zuweilen in einer Mischfarbe die einfachen Farben, welche sie zusammensetzen, wirklich zu sehen, gibt an, ob mehr von der einen oder anderen darin sei. Indessen wird dann ein Akt des auf Erfahrung gegründeten Urteils mit einem Akte der Empfindung verwechselt. Wenn man z. B. Purpur betrachtet, so kann man wissen, daß es überwiegend aus Rot und Violett zusammengesetzt sei, und in welchem Verhältnisse beide ungefähr gemischt sind. Aber man kann nicht wissen, ob in der Farbe noch untergeordnete Mengen von Orange oder Blau enthalten sind. Wäre es die Empfindung und nicht bloß

das auf Erfahrung gestützte Urteil, so müßte man das letztere ebensogut ermitteln können, als das erstere. Beim Weiß, welches die größte Mannigfaltigkeit der Zusammensetzung zuläßt, wird es niemandem einfallen, heraussehen zu wollen, welche einfache Farben darin enthalten sind, ob zwei, oder drei, oder vier, und welche besonderen. Wie leicht aber Täuschung hier möglich ist, zeigt das Grün, in welchem, getäuscht durch die Mischung der Malerfarben, sowohl das Gelb als das Blau zu sehen, Männer wie Goethe und Brewster behauptet haben, während jetzt nachgewiesen werden kann, daß Grün aus jenen Farben gar nicht zusammengesetzt werden kann, wenn man nicht Modifikationen derselben nimmt, die selbst schon grünlich sind.

Am auffallendsten wird die Täuschung, als könnte man zwei einfache Farben gleichzeitig an demselben Orte sehen, wenn eine Fläche gleichzeitig von zwei verschiedenen Farben erleuchtet wird, aber so daß an einzelnen Stellen die eine, an anderen Stellen die andere überwiegt, namentlich wenn die eine den Grund füllt, die andere darauf eine regelmäßige Zeichnung bildet. Besonders günstig ist es auch, wenn die Zeichnung oder die Flecken ihren Ort wechseln. Dann glauben wir oft die beiden Farben gleichzeitig, die eine gleichsam durch die andere hindurch an demselben Orte zu sehen. Wir verfahren in solchen Fällen ebenso, als sähen wir Objekte durch einen farbigen Schleier, oder von einer farbigen Fläche gespiegelt. Wir haben durch Erfahrung gelernt, uns auch unter solchen Umständen ein richtiges Urteil über die wahre Farbe des Objekts zu bilden, und dieselbe Scheidung zwischen der Farbe des Grundes und des darauf unregelmäßig verbreiteten Lichts nehmen wir dann auch in allen ähnlichen Fällen im Urteile vor. Will man die Empfindung der Mischfarben ungestört haben, so muß eben das gemischte Licht in dem ganzen Felde, wo es verbreitet ist, gleichmäßig gemischt sein.

In einzelnen Fällen, namentlich wenn zwei Farben, die im Spektrum weit auseinander liegen, ein scharf begrenztes Feld füllen, erkennen wir die Farben an den Rändern mittels der Farbenzerstreuung im Auge[1] voneinander gesondert. Auch das gibt natürlich keinen brauchbaren Einwurf gegen den aufgestellten Satz, da in diesem Falle das Auge selbst wie ein Prisma wirkt, und bewirkt, daß verschiedene Teile der Netzhaut von dem verschiedenfarbigen Lichte getroffen werden.

Die Methoden, um verschiedenfarbiges Licht zusammenzusetzen, und die Wirkung des zusammengesetzten Lichts auf das Auge zu prüfen, sind die folgenden:

1. Man bringt verschiedene Spektra oder verschiedene Teile desselben Spektrums zum Decken. So erhält man die Zusammensetzungen je zweier einfacher Farben.

2. Man blickt durch eine ebene Glastafel in schräger Richtung nach einer farbigen Fläche, während die dem Beobachter zugekehrte Seite der Glastafel ihm gleichzeitig Licht eines andersfarbigen Objekts durch Reflexion zusendet. So gelangt in das Auge des Beobachters gleichzeitig von der Glastafel durchgelassenes Licht der einen und reflektiertes Licht der anderen Farbe, und beide treffen dieselben Teile der Netzhaut. Auf diese Weise kann man namentlich bequem die zusammengesetzten Farben der Naturkörper weiter zusammensetzen.

[1] S. oben Bd. I. S. 148.

3. Man läßt auf dem Farbenkreisel Scheiben schnell rotieren, auf denen verschiedenfarbige Sektoren angebracht sind. Ist die Rotation schnell genug, so verbinden sich die Eindrücke, welche die verschiedenen Farben auf der Netzhaut machen, zur Empfindung einer einzigen Farbe, der Mischfarbe.

Alle drei Methoden geben in Rücksicht der Farbenmischung gleiche Resultate, ihre Ausführung wird unten spezieller beschrieben werden. Nicht angewendet werden darf die Methode der Mischung pulveriger oder flüssiger Pigmente, welche von Newton und vielen anderen Physikern als gleichgeltend mit der ersten Methode, der Mischung von Spektralfarben, betrachtet worden ist. Denn der gemischte Farbstoff gibt keineswegs ein Licht, welches die Summe der von den einzelnen, in der Mischung enthaltenen Farbstoffen reflektierten Lichter wäre.

Nehmen wir, um dies deutlich zu machen, zunächst farbige Flüssigkeiten. Das Licht, welches durch sie hindurchgeht, wird durch Absorption gefärbt, d. h. es werden von den verschiedenfarbigen Strahlen des weißen Lichts einige, schon nachdem sie eine kurze Strecke in der Flüssigkeit zurückgelegt haben, so geschwächt, daß sie verschwinden, während andere längere Strecken der Flüssigkeit durchlaufen können, ohne merklich geschwächt zu werden. In dem ausgetretenen Lichte überwiegen die letzteren, und dieses Licht hat also die Farbe derjenigen Strahlen, welche am wenigsten von der Flüssigkeit absorbiert werden. Diese Absorption einzelner Farben des Spektrums kann man nachweisen, wenn man solches Licht, welches durch eine farbige Flüssigkeit (oder farbiges Glas) gegangen ist, nachher ein Prisma passieren läßt, und ein Spektrum bildet. In dem Spektrum fehlt dann eine Reihe von Farben, oder ist sehr schwach, während die Teile des Spektrums, deren Farbe der Flüssigkeit entspricht, die gewöhnliche Helligkeit haben.

Mischt man nun zwei farbige Flüssigkeiten miteinander, welche sich gegenseitig chemisch nicht verändern, so daß die Absorptionskraft jeder einzelnen für die verschiedenfarbigen Lichtstrahlen unverändert bleibt, so gehen nur solche Strahlen durch die Mischung, welche von keiner der beiden Flüssigkeiten absorbiert werden. Das sind gewöhnlich die Strahlen, welche in der prismatischen Reihe in der Mitte liegen zwischen den Farben der beiden gemischten Flüssigkeiten. Die meisten blauen Körper, z. B. die Kupferoxydsalze, lassen die blauen Strahlen ungeschwächt, etwas weniger gut die grünen und violetten, schlecht dagegen die roten und gelben hindurch. Die gelben Farbstoffe dagegen lassen fast alle das Gelb ungeschwächt, gut auch noch Rot und Grün, schlechter Blau und Violett hindurch. Unter solchen Umständen wird durch eine Mischung einer gelben und blauen Flüssigkeit meistenteils das Grün am besten hindurchgehen, weil die blaue Flüssigkeit die roten und gelben, die gelbe Flüssigkeit die blauen und violetten Strahlen zurückhält. Es ist eine Wirkung derselben Art, als wenn man Licht durch zwei verschiedenfarbige Glasplatten hintereinander gehen läßt, wodurch es immer viel mehr geschwächt wird, als wenn es durch zwei Platten gleicher Farbe gegangen ist. Aber es ist klar, daß hierbei keine Summation des Lichtes stattfindet, welches jede einzelne Flüssigkeit für sich hindurchläßt, sondern im Gegenteil eine Art von Subtraktion, insofern die gelbe Flüssigkeit von den durch die blaue gegangenen Strahlen noch alle die wegnimmt, welche in ihr der Absorption verfallen. Daher sind auch Mischungen farbiger Flüssigkeiten in der Regel viel dunkler als jede einzelne Flüssigkeit für sich.

Bei den pulverigen Farbstoffen verhält es sich ganz ähnlich. Wir müssen jedes einzelne Pulverteilchen eines Farbstoffes als ein kleines durchsichtiges Körperchen betrachten, welches das Licht durch Absorption färbt. Allerdings ist das Pulver solcher Farbstoffe im ganzen genommen in hohem Grade undurchsichtig. Indessen wo wir Gelegenheit haben, Farbstoffe in zusammenhängenden Massen von gleichmäßig dichter Struktur zu sehen, finden wir sie wenigstens in dünnen Blättern durchsichtig. Ich erinnere an den kristallisierten Zinnober, Grünspan, Chromblei, das blaue Kobaltglas usw., welche wir in fein pulverigem Zustande als Farbstoffe benutzen.

Wenn nun Licht auf ein solches aus durchsichtigen Teilen bestehendes Pulver fällt, wird ein kleiner Teil an der oberen Fläche reflektiert, der Rest dringt ein, und wird erst von den tiefer liegenden Begrenzungsflächen der Pulverteilchen zurückgeworfen. Eine einzelne Tafel von weißem Glase reflektiert von senkrecht einfallendem Lichte $^1/_{25}$, zwei solche $^1/_{13}$, eine große Zahl fast alles. Bei Pulver aus weißem Glase müssen wir folglich schließen, daß bei senkrechter Inzidenz ebenfalls nur $^1/_{25}$ des auffallenden Lichts von der obersten Schicht reflektiert wird, das übrige von den tieferen Schichten. Ebenso muß es sich für blaues Licht bei blauem Glase verhalten. Es wird also bei farbigen Pulvern stets nur ein sehr kleiner Teil des Lichtes, welches sie geben, von der obersten Schicht reflektiert, bei weitem das meiste aus tieferen Schichten. Das von der obersten Fläche reflektierte Licht ist weiß, wenn die Reflexion nicht eine metallische ist, erst das aus den tieferen Flächen zurückkehrende ist durch Absorption gefärbt, um so tiefer, je länger sein Weg in der Substanz gewesen ist. Daher ist auch gröberes Pulver desselben Farbstoffs dunkler gefärbt als feineres. Bei der Reflexion kommt es nämlich nur auf die Zahl der Oberflächen an, nicht auf die Dicke der Teilchen. Sind letztere größer, so muß das Licht einen längeren Weg in der Substanz zurücklegen, um die gleiche Menge reflektierender Oberflächen zu treffen, als wenn sie kleiner sind. Die Absorption der absorbierbaren Strahlen ist also in einem groben Pulver stärker, als in einem feineren. Jenes hat eine dunklere und gesättigtere Farbe als letzteres. Die Reflexion an den Oberflächen der Pulverteilchen wird geschwächt, wenn wir ein flüssiges Verbindungsmittel zwischen sie bringen, dessen Brechungsvermögen dem ihrigen näher steht als das der Luft. Trockene Pulver von Pigmenten sind deshalb in der Regel weißlicher, als wenn sie mit Wasser oder mit dem noch stärker brechenden Öl durchtränkt sind.

Wenn nun ein gemischtes farbiges Pulver Licht nur aus der obersten Schicht reflektierte, in welcher Teilchen von beiden Farben gleichmäßig durcheinander liegen, würde das zurückgeworfene Licht wirklich die Summe der Lichter sein, welche die einzelnen ungemischten Pulver geben. Für die größere Menge reflektierten Lichts aber, welches aus den tieferen Schichten zurückkommt, ist das Verhältnis ebenso wie bei gemischten farbigen Flüssigkeiten, oder hintereinander gelegten farbigen Gläsern. Dieses Licht hat auf seinem Wege Pulverteilchen von beiderlei Art passieren müssen, und enthält also nur noch diejenigen Lichtstrahlen, welche durch beide Arten von Pulverteilchen hindurchgehen können. Für den größeren Teil des Lichts, welches von gemischtem Farbenpulver zurückgeworfen wird, findet also nicht eine Addition beider Farben, sondern in dem Sinne, wie vorher erläutert wurde, eine Subtraktion statt. Daher erklärt sich auch die Tatsache, daß die Mischungen von Pigmenten viel dunkler sind, als die einfachen Pigmente, namentlich, wenn ihre Farben weit auseinander

liegen. Zinnober und Ultramarin geben z. B. ein Schwarzgrau, welches kaum einen Schein von Violett, der Mischfarbe des roten und blauen Lichts, hat, weil das eine Pigment die Strahlen des anderen fast vollständig ausschließt. Bequem kann man diese Unterschiede sichtbar machen, wenn man auf einen Farbenkreisel, Fig. 14, am Rande Sektoren *a* und *b* mit zwei einfachen Farbstoffen überzieht, in der Mitte *c* aber die Mischung der Farbstoffe selbst aufträgt. So geben Kobaltblau und Chromgelb am Rande, wo sie getrennt aufgetragen sind, und beim Drehen der Scheibe sich der Eindruck ihres farbigen Lichts erst in der Netzhaut verbindet, weißliches Grau, während ihre materielle Mischung ein viel dunkleres Grün gibt.

Es dürfen also die Resultate der Mischung von Malerfarben durchaus nicht benutzt werden, um daraus Schlüsse auf die Mischung farbigen Lichtes zu machen. So ist z. B. der Satz, daß Gelb und Blau Grün gibt, für die Mischung von Malerfarben ganz richtig, aber fälschlich auf die Mischung farbigen Lichts übertragen worden.

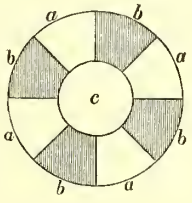


Fig. 14.

Obgleich nun die Bezeichnungen Farbenmischung und Mischfarbe von der Mischung der Farbstoffe hergenommen sind, so wollen wir sie hier doch für die Zusammensetzung farbigen Lichts beibehalten, auf welche sie nicht ganz rechtmäßigerweise übertragen sind, machen aber darauf aufmerksam, daß, wenn nicht ausdrücklich das Gegenteil gesagt ist, darunter nicht die Mischung von Farbstoffen und deren Resultat verstanden werden darf.

Durch die gleichzeitige Einwirkung verschiedener einfacher Farben auf dieselbe Stelle der Netzhaut entsteht nun eine neue Reihe von Farbenempfindungen, welche durch die einfachen Spektralfarben nicht hervorgebracht werden. Diese neuen Empfindungen sind die des Purpurs, des Weiß und der Übergangsstufen des Weiß einerseits in die Spektralfarben und Purpur andererseits.

Purpurrot entsteht durch Mischung derjenigen einfachen Farben, welche am Ende des Spektrums stehen. Am gesättigtesten fällt es aus, wenn man Violett und Rot mischt, weißlicher wird es, Rosenrot, wenn man statt des Violett Blau und statt des Rot Orange nimmt. Das Purpurrot, welches durch Karminrot in das Rot des Spektrums übergeht, ist durchaus verschieden von den beiden Farben Rot und Violett, welche an den äußersten Grenzen des gewöhnlich sichtbaren Spektrums stehen, bildet aber für das Auge einen Übergang zwischen beiden mit kontinuierlichen Zwischenstufen, so daß dadurch die Reihe der gesättigten Farben, d. h. derjenigen, welche die wenigste Ähnlichkeit mit Weiß haben, in sich zurücklaufend wird.

Weiß entsteht durch Zusammensetzung verschiedener Paare von einfachen Farben. Farben, welche in einem bestimmten Verhältnisse gemischt Weiß geben, nennt man komplementäre Farben. Es sind unter den Spektralfarben komplementär:

| | | |
|---|---|---|
| Rot | und | Grünlichblau |
| Orange | | Cyanblau |
| Gelb | | Indigblau |
| Grünlichgelb | | Violett. |

Das Grün des Spektrums hat keine einfache Komplementärfarbe, sondern nur eine zusammengesetzte, nämlich Purpur.

Um zu ermitteln, ob etwa regelmäßige Verhältnisse zwischen den Wellenfängen der einfachen komplementären Farben bestehen, habe ich für eine Reihe komplementärer Farbenpaare die Wellenlängen bestimmt, und lasse diese Messungen hier folgen. Die Längeneinheit ist ein Millionteil eines Millimeters.*

| Farbe | Wellenlänge | Komplementärfarbe | Wellenlänge | Verhältnis der Wellenlängen |
|---|---|---|---|---|
| Rot . . . . . | 656,2 | Grünblau . . . | 492,1 | 1,334 |
| Orange . . . . | 607,7 | Blau . . . . . | 489,7 | 1,240 |
| Goldgelb . . . | 585,3 | Blau . . . . . | 485,4 | 1,206 |
| Goldgelb . . . | 573,9 | Blau . . . . . | 482,1 | 1,190 |
| Gelb . . . . . | 567,1 | Indigblau . . . | 464,5 | 1,221 |
| Gelb . . . . . | 564,4 | Indigblau . . . | 461,8 | 1,222 |
| Grüngelb . . . | 563,6 | Violett . . . . | von 433 ab | 1,301 |

Im Violett mußten seiner Lichtschwäche wegen die äußersten Strahlen von der Wellenlänge 1600 ab alle zusammengefaßt werden.

Nach diesen Messungen sind in der S. 106 stehenden Fig. 15 in horizontaler Richtung die Wellenlängen der Farben von 400 bis 700 der obigen Einheiten aufgetragen, in vertikaler die der zugehörigen Komplementärfarben. Die Kurven drücken also die Wellenlänge der Komplementärfarbe als Funktion der Wellenlänge jeder einfachen Farbe aus. Am Rande stehen die Namen der den Wellenlängen entsprechenden Farben. Die wirklich gemessenen Werte sind durch Sternchen oder Strichelchen, die die Kurven schneiden, bezeichnet. Diese Kurven zeigen eine auffallende Unregelmäßigkeit der Verteilung der komplementären Farben im Spektrum an. Wenn man auf der horizontalen Abszissenlinie vom Violett zum Rot fortschreitet, ändert sich die Wellenlänge der Komplementärfarbe, wie die fast horizontal liegende Kurve anzeigt, äußerst langsam. Gelangt man zu den grünlich blauen Farben, so ändert sich jene Länge dagegen außerordentlich schnell, der aufsteigende Ast der Kurve nähert sich einer senkrechten Linie. Das letztere ist ebenso im Gelb der Fall, während am roten Ende die Änderung wieder äußerst langsam wird. Es hängt dies damit zusammen, daß, wie ich schon im vorigen Paragraphen bemerkt habe, der Farbenton an den Enden des Spektrums sich im Verhältnis zu den Wellenlängen außerordentlich langsam, in der Mitte dagegen sehr schnell ändert. Demgemäß ist denn auch zwischen den Wellenlängen verschiedener Komplementärfarben durchaus kein einfaches oder konstantes Ver-

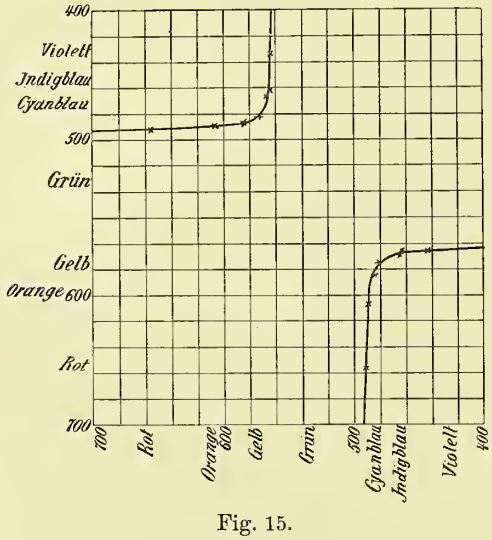


Fig. 15.

* In der ersten Auflage ist als Längeneinheit der Pariser Zoll gewählt worden. Die Umrechnung in Millimeter und die entsprechende Änderung der zugehörigen Figur findet sich schon in der zweiten Auflage. N.

hältnis aufzufinden. Es schwankt, wenn man die musikalische Bezeichnungsweise anwendet, zwischen dem der Quarte (1,333) und dem der kleinen Terz (1,20).

Ich bemerke übrigens hier noch, daß die Lichtintensitäten zweier komplementärer einfacher Farben, welche zusammen gerade Weiß geben, dem Auge durchaus nicht immer gleich hell erscheinen. Nur bei der Mischung von Cyanblau und Orange sind Mengen beider Farben von einer dem Auge ungefähr gleich erscheinenden Lichtmenge notwendig. Sonst erscheinen Violett, Indigblau und Rot dunkler als die komplementären Mengen des dazu gehörigen Grünlichgelb, Gelb oder Grünlichblau. Da, wie sich im nächsten Paragraphen ergeben wird, die Vergleichungen der Helligkeit proportionaler Mengen verschiedenfarbigen Lichtes durch das Auge sehr verschieden ausfallen bei verschiedener absoluter Lichtstärke, so lassen sich auch für die Verhältnisse der Helligkeit komplementärer Mengen verschiedener Farbenpaare keine bestimmten Zahlen angeben.

Die Spektralfarben haben demnach in Mischungen verschiedene färbende Kraft, sie sind gleichsam Farben von verschiedenem Sättigungsgrade. Violett ist am meisten gesättigt, die anderen folgen ungefähr in folgender Reihe:

Violett
Indigblau
Rot Cyanblau
Orange Grün
Gelb.

*Zusatz von W. Nagel.*

Es liegen noch Bestimmungen der Komplementärfarbenpaare von seiten anderer Beobachter vor, deren Abweichungen untereinander und von den Helmholtzschen Angaben wohl nicht auf Beobachtungsfehler, sondern auf individuelle Eigentümlichkeiten der Farbensysteme zu beziehen sind. Einen Teil dieser Bestimmungen hat Helmholtz schon in der zweiten Auflage reproduziert. Ich gebe hier eine tabellarische Nebeneinanderstellung der Angaben von Helmholtz, von v. Frey und v. Kries (1), von König und Dieterici (2), sowie von Angier und Trendelenburg (3).

Tabelle der Komplementärfarbenpaare für mehrere Beobachter.

| Helmholtz | | v. Kries | | v. Frey | | König | | Dieterici | | Angier | | Trendelenburg | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 656,2 | 492,1 | 656,2 | 492,4 | 656,2 | 485,2 | 675 | 496,5 | 670 | 494,3 | 669,3 | 490,9 | 669,4 | 491,2 |
| 607,7 | 489,7 | 626 | 492,2 | 626 | 484,6 | 663 | 495,7 | 660 | 494 | 654,6 | 489,0 | 654,9 | 490,5 |
| 585,3 | 485,4 | 612,3 | 489,6 | 612,3 | 483,6 | 650 | 496,7 | 650 | 494,3 | 641,2 | 490,2 | 641,3 | 490,4 |
| 573,9 | 482,1 | 599,5 | 487,8 | 599,5 | 481,8 | 638 | 495,9 | 635 | 494 | 628,1 | 487,9 | 628,4 | 489,2 |
| 567,1 | 464,5 | 587,6 | 484,7 | 587,6 | 478,9 | 615,3 | 496 | 626 | 493,1 | 616,2 | 487,4 | 616,2 | 487,9 |
| 564,4 | 461,8 | 579,7 | 478,7 | 586,7 | 478,7 | 582,6 | 483,6 | 610 | 492,2 | 604,8 | 487,0 | 604,8 | 487,3 |
| 563,6 | von 433 ab | 577 | 473,9 | 577,7 | 473,9 | 578 | 476,6 | 588 | 485,9 | 593,8 | 484,7 | 593,9 | 485,7 |
| | | 575,5 | 469,3 | 572,8 | 469,3 | 576 | 467 | 585,7 | 485,7 | 583,3 | 480,6 | 583,5 | 482,8 |
| | | 572,9 | 464,8 | 570,7 | 464,8 | 574,5 | 455 | 578 | 476,6 | 572,9 | 473,3 | 572,4 | 469,1 |
| | | 571,1 | 460,4 | 569 | 460,4 | 573 | 450 | 575,6 | 470 | | | | |
| | | 571 | 452,1 | 568,1 | 452,1 | | | 571,5 | 455 | | | | |
| | | 570,4 | 440,4 | 566,3 | 440,4 | | | 571,3 | 448 | | | | |
| | | 570,1 | 429,5 | 566,4 | 429,5 | | | 571,4 | 442 | | | | |

1) Arch. f. (Anat. u.) Physiol. 1881, 336. Die Zahlen sind von A. König auf Wellenlängen umgerechnet. 2) Wiedemanns Annal. **33**, 1887. 3) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **39**, 284, 1905. N.

Endlich haben wir noch die Resultate der Mischung solcher Farben zu untersuchen, welche nicht komplementär sind. Darüber läßt sich folgende

Regel aufstellen: Wenn man zwei einfache Farben mischt, die im Spektrum weniger voneinander entfernt sind, als Komplementärfarben, so ist die Mischung eine der zwischenliegenden Farben und zieht desto mehr in das Weiße, je größer der Abstand der gemischten Farben ist, wird dagegen desto gesättigter, je kleiner ihr Abstand. Mischt man dagegen zwei Farben, die in der Spektralreihe weiter voneinander abstehen, als Komplementärfarben, so erhält man Purpur oder solche Farben, die zwischen einer der gemischten und dem entsprechenden Ende des Spektrums liegen. In diesem Falle ist die Mischung desto gesättigter, je größer der Abstand der gemischten Farben im Spektrum ist, sie ist desto weißlicher, je kleiner ihr Abstand ist, vorausgesetzt, daß er immer größer bleibt, als der von zwei Komplementärfarben.

So gibt z. B. Rot, dessen Komplementärfarbe Grünlichblau ist, mit Grün gemischt weißliches Gelb, welches bei wechselnden Mengenverhältnissen der einfachen Farben entweder durch Orange in Rot, oder durch Grünlichgelb in Grün übergehen kann. Orange und Grünlichgelb können gemischt auch reines Gelb geben, welches dann aber gesättigter ist, als das aus Rot und Grün erzeugte. Mischen wir dagegen Rot und Cyanblau, so bekommen wir Rosa (weißliches Purpurrot), welches bei verändertem Mischungsverhältnisse in Rot oder durch Violett und Indigblau in Cyanblau übergehen kann. Dagegen gibt Rot mit Indigblau, und noch mehr mit Violett ein gesättigtes Purpurrot.

Die folgende Tabelle zeigt diese Resultate übersichtlich. An der Spitze der vertikalen und horizontalen Kolumnen stehen die einfachen Farben; wo sich die betreffende vertikale und horizontale Kolumne schneiden, ist die Mischfarbe angegeben, welche übrigens immer bei verändertem Mischungsverhältnisse durch die in der Spektralreihe dazwischenliegenden Farben in jede der beiden einfachen Farben der Mischung übergehen kann.

| | Violett | Indigblau | Cyanblau | Blaugrün | Grün | Grüngelb | Gelb |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Rot | Purpur | dk. Rosa | wß. Rosa | Weiß | wß. Gelb | Goldgelb | Orange |
| Orange | dk. Rosa | wß. Rosa | Weiß | wß. Gelb | Gelb | Gelb | |
| Gelb | wß. Rosa | Weiß | wß. Grün | wß. Grün | Grüngelb | | |
| Grüngelb | Weiß | wß. Grün | wß. Grün | Grün | | | |
| Grün | wß. Blau | Wasserblau | Blaugrün | | | | |
| Blaugrün | Wasserblau | Wasserblau | | | | | |
| Cyanblau | Indigblau | | | | | | |

dk. = dunkel
wss. = weißlich.

Übrigens zeigt es sich auch bei diesen Mischungen wieder, daß die Spektralfarben einen verschiedenen Sättigungsgrad der Farbe haben. So gibt Rot mit gleich hellem Grün gemischt ein rötliches Orange, Violett mit gleich hellem Grün ein dem Violett nahestehendes Indigblau. Dagegen geben Farben von gleicher Sättigung in gleicher Helligkeit gemischt auch Mischfarben, die von ihren beiden Konstituenten ungefähr um gleichviel verschieden sind.

Durch Mischung von mehr als zwei homogenen Farben bekommen wir nun keine neuen Farben mehr, sondern die Zahl derselben ist durch die Mischungen je zweier einfacher Farben schon erschöpft, ja wir haben ja schon bei den letzteren Mischungen gefunden, daß die meisten Mischfarben durch verschiedene Paare von einfachen Farben erzeugt werden konnten. Die Mischungen von zusammengesetzten Farben haben im allgemeinen dasselbe Ergebnis, wie die Mischung der gleichnamigen Spektralfarben, nur fällt die Mischung um so weißlicher aus, als die gemischten Farben selbst schon weißlicher sind, als Spektralfarben.

Somit führen alle möglichen Kombinationen von Ätherwellensystemen verschiedener Schwingungsdauer nur zu einer verhältnismäßig geringen Anzahl verschiedenartiger Erregungszustände des Sehnervenapparats, welche sich in verschiedenen Farbenempfindungen zu erkennen geben. Wir haben als solche kennen gelernt zuerst die Reihe der gesättigten Farben, nämlich der prismatischen Farben, und das die Enden dieser Reihe verbindende Purpur. Jede dieser Farben kann wiederum in verschiedenen Abstufungen mehr oder weniger weißlich vorkommen, und je weißlicher sie ist, desto weniger gesättigt erscheint sie uns. Die am meisten weißlichen Abstufungen dieser Farben gehen endlich in das reine Weiß über. Wir haben hier also zweierlei Arten von Unterschieden zwischen den Farben, nämlich erstens die Unterschiede des Farbentons und zweitens die Unterschiede der Sättigung. Die Unterschiede des Farbentons sind denen zwischen den Spektralfarben entsprechend. Denken wir diese mit geringeren oder größeren Quantitäten weißen Lichts gemischt, so bekommen wir die verschiedenen Sättigungsstufen des betreffenden Farbentons, und können den Grad der Sättigung durch das Verhältnis zwischen den gemischten Lichtmengen der gesättigten Farbe und des Weiß bezeichnen. In der Sprache bezeichnen wir nur selten die weißlichen Farben mit besonderen Namen, wie z. B. weißliches Purpur mit Rosa, weißliches Rot mit Fleischfarbe, weißliches Blau mit Himmelblau, sondern setzen, um sie zu bezeichnen, vor den Namen der Farbe die Zusätze hell, blaß oder weiß, wie z. B. hellblau ungefähr dasselbe wie Himmelblau, blaßblau ein noch weißlicheres Blau, endlich weißblau ein von Weiß wenig unterschiedenes Blau bezeichnet. Betreffs der Bezeichnung weißlicher Farben durch die Vorsatzsilbe „hell“, ist noch zu bemerken, daß diese ihrem Sinne nach eigentlich eine lichtstarke Farbe bezeichnet, und hier der Sprachgebrauch eine lichtstarke Farbe nicht von einer weißlichen unterscheidet, was der im vorigen Paragraphen erwähnten Tatsache entspricht, daß auch dem Auge die lichtstarken gesättigten Farben des Spektrums weißlich erscheinen.

Endlich werden auch noch Unterschiede der Lichtstärke von der Sprache als Arten von Farben bezeichnet, aber nur insofern wir die Farbe als eine Eigenschaft von Körpern betrachten. Mangel des Lichts nennen wir Dunkelheit; einen Körper aber, der kein Licht reflektiert, wenn es auf ihn fällt, nennen wir schwarz; einen Körper dagegen, welcher alles auffallende Licht diffus reflektiert, nennen wir weiß. Ein Körper, der von allem auffallenden Lichte einen gleichen Anteil, aber nicht das Ganze reflektiert, ist grau, und einer, der Licht gewisser Farbe stärker reflektiert als anderes, ist farbig. In diesem Sinne also sind auch Weiß, Grau und Schwarz Farben. Lichtschwache gesättigte Farben unterscheiden wir durch den Zusatz „dunkel“, wie dunkelgrün, dunkelblau; bei äußerst geringer Lichtstärke wenden wir für sie aber auch dieselben Namen an, wie für lichtschwache weißliche Farben, nämlich für lichtschwaches Rot, Gelb, Grün die Namen Rotbraun, Braun und Olivengrün, für überwiegend weißliche Farben von geringer Lichtstärke wählt man dagegen Bezeichnungen wie rötlichgrau, gelbgrau, blaugrau usw.

Das Schwarz ist eine wirkliche Empfindung, wenn es auch durch Abwesenheit alles Lichts hervorgebracht wird. Wir unterscheiden die Empfindung des Schwarz deutlich von dem Mangel aller Empfindung. Ein Fleck unseres Gesichtsfeldes, von welchem kein Licht in unser Auge fällt, erscheint uns schwarz, aber die Objekte hinter unserem Rücken, von denen auch kein Licht in unser Auge fällt, mögen sie nun dunkel oder hell sein, erscheinen uns nicht

schwarz, sondern für sie mangelt alle Empfindung. Bei geschlossenen Augen sind wir uns sehr wohl bewußt, daß das schwarze Gesichtsfeld seine Grenze hat, wir lassen es keineswegs sich bis hinter unseren Rücken erstrecken. Nur diejenigen Teile des Gesichtsfeldes, deren Licht wir wahrnehmen können, wenn solches vorhanden ist, erscheinen schwarz, wenn sie kein Licht aussenden.

Daß Grau identisch sei mit lichtschwachem Weiß, Braun mit lichtschwachem Gelb, Rotbraun mit lichtschwachem Rot, erkennt man am leichtesten durch die prismatische Analyse des Lichts von grauen, blauen oder rotbraunen Körpern, schwerer durch Projektion des Lichts von der betreffenden Farbe und Stärke auf einen Schirm, weil wir fortdauernd die Neigung haben zu trennen, was in der Farbe oder dem Aussehen eines Körpers von der Beleuchtung und was von der Eigentümlichkeit der Körperoberfläche selbst herrührt. Der Versuch muß deshalb so eingerichtet werden, daß der Beobachter verhindert wird zu erkennen, es sei eine besondere Beleuchtung vorhanden. Ein graues Papierblatt, welches im Sonnenschein liegt, kann heller aussehen, als ein weißes, welches im Schatten liegt, während doch das erstere grau, das zweite weiß erscheint, weil wir sehr gut wissen, daß das weiße Blatt in den Sonnenschein gelegt, viel heller sein würde, als das graue, welches zur Zeit darin sich befindet. Wenn man aber eine graue Kreisfläche auf weißem Papier anbringt, und durch eine Sammellinse Licht auf sie konzentriert, ohne daß das weiße Papier gleichzeitig mitbeleuchtet wird, so kann man das Grau weißer erscheinen lassen, als das weiße Papier, so daß in diesem Falle, wo der unbewußte Einfluß des Urteils ausgeschlossen ist, die Empfindungsqualität durchaus nur als abhängig von der Lichtstärke erscheint.

Ebenso gelang es mir, homogenes Goldgelb des Spektrums als Braun erscheinen zu lassen, indem ich mittels einer unten auseinander zu setzenden Methode auf einem weißen unbeleuchteten Schirme ein rechteckiges Feldchen damit beleuchtete, daneben ein größeres Feld des Schirms dagegen mit hellerem weißen Lichte. Rot in derselben Weise angewendet gab Rotbraun, Grün Olivengrün.

Berücksichtigen wir also noch die Lichtintensität, so finden wir, daß die Qualität eines jeden Farbeneindrucks von drei veränderlichen Größen abhängt, nämlich der Lichtstärke, dem Farbentone und seinem Sättigungsgrade. Andere Unterschiede der Qualität des Lichteindrucks existieren nicht. Man kann dieses Resultat in folgender Weise aussprechen:

Der Farbeneindruck, den eine gewisse Quantität $x$ beliebig gemischten Lichts macht, kann stets auch hervorgebracht werden durch Mischung einer gewissen Quantität $a$ weißen Lichtes und einer gewissen Quantität $b$ einer gesättigten Farbe (Spektralfarbe oder Purpur) von bestimmtem Farbentone.

Dieser Satz beschränkt die Menge der verschiedenartigen Farbeneindrücke, wenn sie auch noch unendlich groß bleibt, doch auf ein kleineres Maß, als wenn jede mögliche Kombination verschiedener einfacher Lichtstrahlen einen besonderen Farbeneindruck gäbe. Wollen wir die objektive Natur eines gemischten Lichts vollständig bestimmen, so müssen wir angeben, wieviel Licht von jeder Größe der Wellenlänge darin ist. Da es nun unendlich verschiedene Wellenlängen gibt, ist die physikalische Qualität eines gemischten Lichts nur darzustellen als eine Funktion von unendlich vielen Unbekannten. Dagegen kann der Eindruck, den beliebig gemischtes Licht auf das Auge

macht, immer dargestellt werden als eine Funktion von nur drei Variablen, die in Zahlen ausgedrückt werden können, nämlich 1. der Quantität gesättigten farbigen Lichts, 2. der Quantität weißen Lichts, die gemischt dieselbe Farbenempfindung geben, 3. der Wellenlänge des farbigen Lichts. Dadurch gewinnen wir auch endlich ein Prinzip, wonach wir die Farben in eine systematische Ordnung bringen können. Abstrahiert man nämlich zunächst von den Unterschieden der Lichtstärke, so bleiben noch zwei Veränderliche übrig, von denen die Qualität der Farbe abhängt, nämlich der Farbenton und das Verhältnis des farbigen zum weißen Lichte, und wir können uns die Menge der Farben, wie die verschiedenen Werte einer jeden Größe, welche von zwei Variablen abhängt, in einer Ebene nach ihren zwei Dimensionen hin ausgebreitet denken. Die Reihe der gesättigten Farben ist in sich zurücklaufend, sie muß also auf einer geschlossenen Kurve angebracht werden, für welche Newton einen Kreis, Fig. 16, wählte in dessen Mitte das Weiß steht. Auf den Verbindungslinien des Mittelpunktes mit den einzelnen Punkten der Peripherie sind die Übergangsstufen zwischen dem Weiß und der an dem betreffenden Punkte der Peripherie stehenden gesättigten Farbe anzubringen, so daß die weißlicheren unter ihnen dem Mittelpunkte, die gesättigteren der Peripherie näher stehen. So erhält man eine Farbentafel, die alle möglichen Arten gleich lichtstarker Farben in ihren kontinuierlichen Übergängen geordnet darbietet. Wollte man auch noch die verschiedenen Grade der Lichtstärke der Körperfarben berücksichtigen, so müßte man, wie Lambert es tat, noch die dritte Dimension des Raums zu Hilfe nehmen, und zwar kann man die dunkelsten Farben, bei denen die Zahl der unterscheidbaren Töne immer geringer wird, endlich in eine Spitze, dem Schwarz entsprechend, zusammenlaufen lassen. So erhält man eine Farbenpyramide oder einen Farbenkegel. In Fig. 17 sind drei Querschnitte eines solchen Kegels übereinander liegend dargestellt. Der größte, der Grundfläche entsprechend, würde dieselbe Farbenverteilung wie der Farbenkreis Fig. 16 zeigen müssen. Der mittlere, aus der Mitte des Kegels genommen, zeigt am Rande das Rotbraun, Braun, Olivengrün, Graublau und in seiner Mitte Grau, endlich der kleinste, nahe an der Spitze des Kegels genommen, zeigt Schwarz, wie es die Figur sehen läßt.

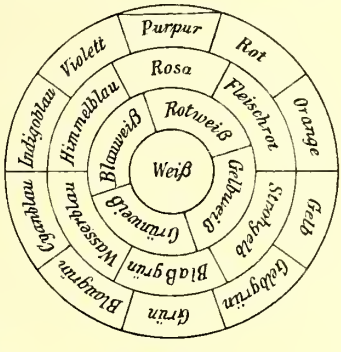



Fig. 16.

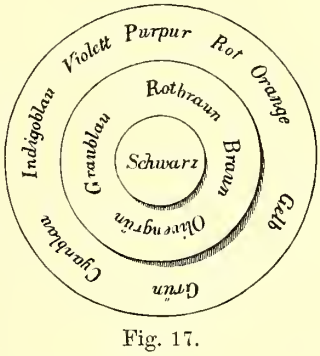



Fig. 17.

Newton hat die Anordnung der Farben in einer Ebene auch noch benutzt, um das Farbenmischungsgesetz auszudrücken. Er dachte sich die Intensität der gemischten Lichter durch Gewichte ausgedrückt, diese Gewichte in der Farbentafel am Orte der betreffenden Farbe angebracht, und konstruierte den Schwerpunkt der Gewichte, dann soll der Ort dieses Schwerpunkts in der Farbentafel die Mischfarbe geben, die Summe der Gewichte ihre Intensität. Grassmann hat die Prinzipien, welche in diesem Newtonschen Verfahren ver-

borgen liegen, entwickelt und ausgesprochen. Außer dem schon oben erwähnten Satze, daß:

1. Jede beliebig zusammengesetzte Mischfarbe gleich aussehen müsse, wie die Mischung einer bestimmten gesättigten Farbe mit Weiß, sind dazu noch folgende Sätze notwendig:
2. Wenn von zwei zu vermischenden Lichtern das eine sich stetig ändert, ändert sich auch das Aussehen der Mischung stetig.
3. Gleich aussehende Farben gemischt geben gleich aussehende Mischungen.

Wenn wir diese drei Grundsätze annehmen, läßt sich eine Anordnung der Farben in einer Ebene herstellen, welche erlaubt, die Mischfarbe durch eine Schwerpunktskonstruktion zu finden. Wir wollen eine solche Farbentafel, in welcher die Mischfarben nach dem Prinzip der Schwerpunktskonstruktionen gefunden werden, eine geometrische Farbentafel nennen. Da die Lichtintensitäten verschiedenfarbigen Lichts keine allgemeingültig quantitative Vergleichung durch das Auge zulassen, so muß man sich bei der Konstruktion einer solchen Tafel vorbehalten, die Einheit der Lichtquantität jeder Farbe durch die Newtonsche Regel der Farbenmischung selbst festzusetzen. Wenn man drei Farben beliebig wählt, von denen aber keine durch Mischung der beiden anderen erzeugt werden kann, ihnen drei beliebige Orte in der Farbentafel anweist, die nicht in einer geraden Linie liegen, und die Einheiten ihrer Lichtintensität beliebig festsetzt, so ist nachher der Ort und die Einheit der Lichtintensität jeder anderen Farbe in der Farbentafel fest bestimmt.

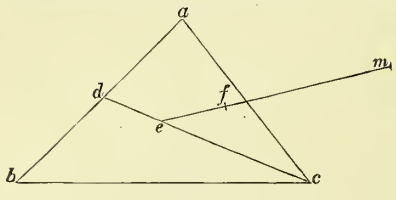


Fig. 18.

Konstruktion der Farbentafel. Wenn die drei Farben $A$, $B$, $C$, von denen man ausgehen will, gewählt, die Einheiten ihrer Lichtintensität und ihre Orte in der Farbentafel bestimmt sind, die wir mit $a$, $b$ und $c$ in Fig. 18 bezeichnen wollen, so mische man die Quantitäten $\alpha$ der Farbe $A$ und $\beta$ der Farbe $B$, und setze die Mischfarbe in den gemeinschaftlichen Schwerpunkt der Gewichte $\alpha$ und $\beta$, von denen $\alpha$ im Punkt $a$ und $\beta$ im Punkt $b$ befindlich gedacht wird. Der Schwerpunkt $d$ liegt in der Verbindungslinie $ab$ der beiden Gewichte und es muß sein

$$\alpha \times ad = \beta \times bd.$$

So liegen denn überhaupt alle Mischfarben von $A$ und $B$ auf der Linie $ab$. Soll nun mit den Quantitäten $\alpha$ und $\beta$ der Farben $A$ und $B$ auch noch die Quantität $\gamma$ der Farbe $C$ gemischt werden, so können wir erst $\alpha$ und $\beta$ wie vorher gemischt denken, die Mischfarbe, deren Quantität mit $\alpha + \beta$ bezeichnet werden muß, in $d$ eingesetzt, und nun den Schwerpunkt $e$ der beiden Gewichte $\alpha + \beta$ in $d$ und $\gamma$ in $c$ konstruieren, welcher in der Linie $cd$ liegen muß. Hier ist der Ort der gemeinsamen Mischfarbe, deren Quantität $\varepsilon$ gesetzt werden muß

$$\varepsilon = \alpha + \beta + \gamma.$$

Dadurch ist auch die Einheit der Lichtstärke für diese Farbe bestimmt; diese ist

$$1 = \frac{\varepsilon}{\alpha + \beta + \gamma}.$$

Es ist dabei ersichtlich, daß jede aus den drei Farben $A$, $B$, $C$ mischbare Farbe innerhalb des Dreiecks $a\,b\,c$ liegen muß; für jede ist in der angegebenen Weise Ort und Einheit der Lichtstärke zu bestimmen.

Denkt man sich die Orte und Maßeinheiten aller aus den drei Farben $A$, $B$ und $C$ mischbaren Farben bestimmt, so kann man nun auch die Orte und Maßeinheiten der aus $A$, $B$ und $C$ nicht mischbaren Farben bestimmen. Es sei $M$ eine solche Farbe. Man kann jedenfalls eine so kleine Quantität $\mu$ dieser Farbe wählen, daß, wenn man sie mit einer der Farben des Dreiecks mischt, die Mischfarbe auch noch innerhalb des Dreiecks liegt. Man mische sie z. B. mit der Quantität $\varepsilon$ (diese nach der schon festgesetzten Einheit gemessen) der in $e$ befindlichen Farbe. Denkt man sich die Quantität der Farbe $M$ anfangs unendlich klein, und stetig steigend bis $\mu$, so wird die Mischfarbe anfangs die in $e$ befindliche Farbe selbst sein, sich nach dem vorangestellten Grundsatze stetig ändern, d. h. kontinuierlich in die benachbarten Farben übergehen. Ist die Quantität von $M$ bis $\mu$ gewachsen, so möge $f$ der Ort und $\varphi$ die Quantität der betreffenden Mischfarbe sein, und $f$ noch innerhalb des Dreiecks liegen. Gemäß unserer Regel muß erstens sein

$$\varphi = \varepsilon + \mu .$$

Dadurch ist die Quantität $\mu$ auf die von uns festgesetzten Maßeinheiten zurückgeführt. Zweitens muß $f$ der Schwerpunkt von $\mu$ in $m$ und $\varepsilon$ in $e$ sein, d. h. es muß $m$ in der Verlängerung der Linie $e\,f$ liegen, und

$$\frac{m\,f}{e\,f} = \frac{\varepsilon}{\mu} .$$

Dadurch ist also auch die Lage und die Maßeinheit der Farbe $M$ festgesetzt und kann ebenso für alle anderen aus $A$, $B$ und $C$ nicht mischbaren Farben bestimmt werden.

Beweis der Richtigkeit dieser Konstruktion. Es muß nun gezeigt werden, daß in einer so konstruierten Farbentafel, für welche auch die Maßeinheiten der Lichtquantität der verschiedenen Farben in der angegebenen Weise festgesetzt sind, die Mischfarbe zweier beliebigen Farben sich im Schwerpunkt der gemischten Farben vorfindet, und ihre Lichtintensität, nach den festgesetzten Einheiten gemessen, gleich ist der Summe der Quantitäten der gemischten Lichter.

Wenn wir uns die Lage der Massenpunkte $m_1$, $m_2$, $m_3$ usw. durch rechtwinkelige Koordinaten $x_1$, $y_1$; $x_2$, $y_2$; $x_3$, $y_3$ usw. gegeben denken, so sind die Koordinaten $X$ und $Y$ des Schwerpunkts gegeben durch die Gleichungen

$$\begin{aligned} X(m_1 + m_2 + m_3 + \text{usw.}) &= m_1 x_1 + m_2 x_2 + m_3 x_3 + \text{usw.} \\ Y(m_1 + m_2 + m_3 + \text{usw.}) &= m_1 y_1 + m_2 y_2 + m_3 y_3 + \text{usw.} \end{aligned}$$

Im folgenden bezeichnen wir die Koordinaten des mit irgend einem beliebigen Buchstaben $n$ bezeichneten Punktes mit $x_n$ und $y_n$.

A. Es sollen gemischt werden zwei Farben $E_0$ und $E_1$, welche selbst aus den drei ursprünglich gewählten Farben $A$, $B$ und $C$ gemischt werden können. Es seien die Quantitäten $\varepsilon_0$ und $\varepsilon_1$ der Farben $E_0$ und $E_1$ mischbar aus den Quantitäten $\alpha_0$, $\beta_0$, $\gamma_0$ und beziehlich $\alpha_1$, $\beta_1$, $\gamma_1$ der Farben $A$, $B$, $C$, so ist nach der Konstruktionsregel, wenn wir mit $x_0$ $y_0$ die Koordinaten des Ortes von $\varepsilon_0$ mit $x_1$, $y_1$ die von $\varepsilon_1$ in der Farbentafel bezeichnen

$$\begin{aligned} x_0(\alpha_0+\beta_0+\gamma_0) &= \alpha_0 x_a + \beta_0 x_b + \gamma_0 x_c \\ x_1(\alpha_1+\beta_1+\gamma_1) &= \alpha_1 x_a + \beta_1 x_b + \gamma_1 x_c \\ y_0(\alpha_0+\beta_0+\gamma_0) &= \alpha_0 y_a + \beta_0 y_b + \gamma_0 y_c \\ y_1(\alpha_1+\beta_1+\gamma_1) &= \alpha_1 y_a + \beta_1 y_b + \gamma_1 y_c \\ \varepsilon_0 &= \alpha_0+\beta_0+\gamma_0 \\ \varepsilon_1 &= \alpha_1+\beta_1+\gamma_1. \end{aligned}$$

Nun ist nach dem Grundsatze, daß gleichaussehende Farben gemischt gleichaussehende Mischfarben geben, die Mischfarbe von $\varepsilon_0$ und $\varepsilon_1$ dieselbe wie von $\alpha_0\beta_0\gamma_0$ und $\alpha_1\beta_1$ und $\gamma_1$, die Koordinaten $X$ und $Y$ des Ortes der letzteren Mischung sind bei der Konstruktion der Farbentafel durch die Gleichungen

$$\begin{aligned} X(\alpha_0+\beta_0+\gamma_0+\alpha_1+\beta_1+\gamma_1) &= (\alpha_0+\alpha_1)x_a + (\beta_0+\beta_1)x_b + (\gamma_0+\gamma_0)x_c \\ Y(\alpha_0+\beta_0+\gamma_0+\alpha_1+\beta_1+\gamma_1) &= (\alpha_0+\alpha_1)y_a + (\beta_0+\beta_1)y_b + (\gamma_0+\gamma_0)y_c \end{aligned}$$

oder indem man mittels der obigen sechs Gleichungen $x_a$, $x_b$, $x_c$ und $y_a$, $y_b$ und $y_c$ eliminiert

$$\begin{aligned} X(\varepsilon_0+\varepsilon_1) &= \varepsilon_0 x_0 + \varepsilon_1 x_1 \\ Y(\varepsilon_0+\varepsilon_1) &= \varepsilon_0 y_0 + \varepsilon_1 y_1 \end{aligned}$$

d. h. die Koordinaten $x$, $y$ der Mischfarbe von $\varepsilon_0$ und $\varepsilon_1$ sind dieselben, wie die des Schwerpunkts von $\varepsilon_0$ und $\varepsilon_1$.

Die gesamte Lichtquantität $q$ der Mischung von $\varepsilon_0$ und $\varepsilon_1$ muß wiederum gleich sein der Lichtquantität, welche bei Mischung der gleichaussehenden Quantitäten $\alpha_0+\beta_0+\gamma_0$ einerseits und $\alpha_1+\beta_1+\gamma_1$ andererseits entsteht, d. h.

$$q = \alpha_0+\beta_0+\gamma_0+\alpha_1+\beta_1+\gamma_1 = \varepsilon_0+\varepsilon_1,$$

womit die Richtigkeit der gegebenen Konstruktionsregel für alle aus $A$, $B$ und $C$ mischbaren Farben auf der in gesagter Weise konstruierten Farbentafel erwiesen ist.

B. Wenn zwei nicht aus $A$, $B$ und $C$ mischbare Farben $M_0$ und $M_1$ gemischt werden sollen. Es seien $x_0$, $y_0$ die Koordinaten, $\mu_0$ die Quantität der Farbe $M_0$, $x_1$ und $y_1$ seien die Koordinaten, $\mu_1$ die Quantität der Farbe $M_1$. Es sei der Ort von $M_0$ in der Farbentafel dadurch gefunden worden, daß die Quantität $\mu_0$ mit der Quantität $\varepsilon_0$ der im Punkte $e$ befindlichen Farbe $E$ gemischt, die Quantiät $\varphi$ der in $f$ befindlichen Farbe $F$ gegeben hat, so ist

$$\begin{aligned} \varepsilon_0+\mu_0 &= \varphi \\ \varphi x_f &= \varepsilon_0 x_e + \mu_0 x_0 \\ \varphi y_f &= \varepsilon_0 y_e + \mu_0 y_0. \end{aligned}$$

Ebenso sei der Ort der Farbe $M_1$ dadurch gefunden worden, daß $\mu_1$ gemischt mit der Quantität $\varepsilon_1$ der Farbe $E$ die Quantität $\psi$ der im Punkte $g$ befindlichen Farbe $G$ gegeben hat. Es ist

$$\begin{aligned} \varepsilon_1+\mu_1 &= \psi \\ \psi x_g &= \varepsilon_1 x_e + \mu_1 x_1 \\ \psi y_g &= \varepsilon_1 y_e + \mu_1 y_1. \end{aligned}$$

Um den Ort der Mischfarbe von $\mu_0$ und $\mu_1$ in derselben Weise zu bestimmen, mische man diese mit der Quantität $\varepsilon_0+\varepsilon_1$ der Farbe $E$. Dies kommt aber

darauf hinaus, daß man die Quantitäten $\varphi$ und $\psi$ der Farben $F$ und $G$ mischt. Die Koordinaten dieser Mischfarbe seien $\xi$ und $v$, gegeben durch die Gleichungen

$$(\varphi + \psi)\xi = \varphi x_f + \psi x_g$$
$$(\varphi + \psi)v = \varphi y_f + \psi y_g.$$

Dann sind die Koordinaten $X$ und $Y$ der Mischfarbe von $\mu_0$ und $\mu_1$, deren noch unbestimmte Quantität mit $\eta$ bezeichnet werde, gegeben durch die Gleichungen

$$(\varphi + \psi)\xi = (\varepsilon_0 + \varepsilon_1)x_e + \eta X$$
$$(\varphi + \psi)v = (\varepsilon_0 + \varepsilon_1)y_e + \eta Y$$
$$\varphi + \psi = \varepsilon_0 + \varepsilon_1 + \eta.$$

Indem man mit Hilfe der früheren Gleichungen hieraus $\varphi$, $\psi$, $x_e$ und $y_e$ eliminiert, erhält man:

$$\mu_0 x_0 + \mu_1 x_1 = \eta X$$
$$\mu_0 y_0 + \mu_1 y_1 = \eta Y$$
$$\mu_0 + \mu_1 = \eta,$$

wonach die Mischfarbe von $\mu_0$ und $\mu_1$ wirklich, wie verlangt wurde, im Schwerpunkte beider Massen liegt, und ihre Quantität der Summe beider Quantitäten gleich ist.

C. Wenn eine aus $A$, $B$, $C$ mischbare und eine nicht mischbare Farbe gemischt werden sollen, ist ähnlich zu verfahren, wie im Falle $B$. Es sei $\mu_0$ die Menge der aus $A$, $B$, $C$ nicht mischbaren Farbe und ihre Koordinaten $x_0$, $y_0$ seien dadurch gefunden, daß sie mit der Quantität $\varepsilon_0$ der im Punkte $E$ stehenden Farbe gemischt, die Quantität $\varphi$ der in $F$ stehenden Farbe gegeben habe. Demnach ist

$$\mu_0 x_0 + \varepsilon_0 x_e = \varphi x_f$$
$$\mu_0 y_0 + \varepsilon_0 y_e = \varphi y_f$$
$$\mu_0 + \varepsilon_0 = \varphi.$$

Der Ort der Mischfarbe $\eta$ aus $\mu_0$ und einer aus $A$, $B$, $C$ mischbaren Farbe $\mu$, Punkte $G$ befindlich, ergibt sich, indem man $\eta$ mit $\varepsilon_0$ mischt, und dann nach der gegebenen Konstruktionsregel weiter verfährt. Da aber $\eta$ aus $\mu_0$ und $\mu_1$ zusammengesetzt ist, kann man auch zuerst $\mu_0$ und $\varepsilon_0$ mischen, wobei man nach der Voraussetzung die Quantität $\varphi$ der in $F$ stehenden Farbe erhält, und dann $\varphi$ mit $\mu_1$. Der gemeinsame Schwerpunkt beider ist der Ort der Mischfarbe von $\eta$ und $\varepsilon_0$, seine Koordinaten $\xi$ und $v$ sind durch folgende Gleichungen gegeben

$$(\varphi + \mu_1)\xi = \varphi x_f + \mu x_g$$
$$(\varphi + \mu_1)v = \varphi y_f + \mu y_g.$$

Die Koordinaten $X$ und $Y$ von $\eta$ sind nun nach der aufgestellten Konstruktionsregel zu finden durch die Gleichungen

$$(\varphi + \mu_1)\xi = \eta X + \varepsilon_0 x_e$$
$$(\varphi + \mu_1)v = \eta Y + \varepsilon_0 y_e$$
$$\varphi + \mu_1 = \eta + \varepsilon_0,$$

woraus schließlich folgt

$$\eta X = \mu_0 x_0 + \mu_1 x_g$$
$$\eta Y = \mu_0 y_0 + \mu_1 y_g$$
$$\eta = \mu_0 + \mu_1,$$

was zu erweisen war.

Bisher haben wir zur Bestimmung des Ortes der aus $A, B, C$ nicht mischbaren Farben immer nur ihre Mischung mit einer einzigen Farbe $E$ angewendet. Der letzte Satz zeigt aber, daß auch die Anwendung jeder anderen Farbe $G$ dieselben Bestimmungen der Farbenorte geben würde.

Es läßt sich nicht von vornherein übersehen, welche Gestalt die Kurve haben werde, in welche bei einer solchen Konstruktion die einfachen Farben zu stehen kommen. Diese Kurve wird sogar sehr mannigfach sein können, je nach der Wahl der drei Farben, mit denen man die Konstruktion beginnt, und ihrer drei Maßeinheiten, die man willkürlich festsetzt. Eine Maßeinheit muß immer willkürlich bleiben, ebenso die Lage zweier Punkte, in die man zwei der gewählten Farben setzt. Erst von den anderen 4 Stücken hängt dann die Form jener Kurve ab. Man kann also noch vier Bedingungen festsetzen, welche sich im allgemeinen durch eine entsprechende Wahl der vier anderen willkürlich gebliebenen Größen werden erfüllen lassen. So würde man zum Beispiel verlangen können, daß in der Farbentafel die Entfernung fünf beliebig gewählter einfacher Farben vom Weiß gleichgroß sein solle. Es würde alsdann die Grenzkurve der Farbentafel, welche die einfachen Farben enthält, sich kaum merklich von Newtons Kreise unterscheiden, wie er in Fig. 16 dargestellt ist, nur würde zwischen dem äußersten Rot und Violett die Sehne, welche dort gezeichnet ist, statt des Bogens die Fläche begrenzen müssen, weil das Purpur, welches nur aus den beiden genannten Farben gemischt werden kann, auf der geraden Verbindungslinie beider Farben liegen müßte. Außerdem folgt aus den Prinzipien der Konstruktion, daß jede zwei Komplementärfarben an entgegengesetzten Enden eines Durchmessers des Kreises liegen müssen, weil die Mischfarbe Weiß immer in der Verbindungslinie derjenigen Farben liegen muß, aus denen sie gemischt ist. Diese Bedingung ist auch in Fig. 16 erfüllt.

Was die festzusetzenden Maßeinheiten der Lichtintensität verschiedenfarbigen Lichts betrifft, so würden für diesen Fall, wo man das Farbenfeld durch eine Kreislinie begrenzen läßt, komplementäre Mengen der Komplementärfarben, d. h. solche Mengen, welche gemischt Weiß geben, als gleich groß angesehen werden müssen, weil nach der Voraussetzung ihre Mischfarbe Weiß gleich weit von ihnen entfernt liegt. Der Schwerpunkt zweier Gewichte kann aber nur dann im Mittelpunkte ihrer Verbindungslinie liegen, wenn die Gewichte gleich sind. Ferner würden von anderen nicht komplementären Farben solche Mengen als gleich groß angesehen werden, welche mit einer genügenden Quantität ihrer Komplementärfarbe vereinigt gleiche Quantitäten Weiß geben. Aus dem, was ich früher über die verschiedene Sättigung der Spektralfarben angeführt habe, geht schon hervor, daß die Quantitäten, welche hier als gleich betrachtet werden, dem Auge durchaus nicht gleich hell erscheinen. Im nächsten Paragraphen indessen wird sich zeigen, daß die Vergleichung der Helligkeit durch das Auge bei verschiedener absoluter Lichtstärke sehr verschiedene Resultate ergibt, und daß im Gegenteil eine Festsetzung der Maßeinheit verschiedener Farben nach den Resultaten der Mischung in einem gewissen Sinne wenigstens für alle Grade der Lichtstärke gültig bleibt.

Will man dagegen in der Farbentafel als gleich groß solche Quantitäten verschiedenfarbigen Lichts betrachten, welche dem Auge bei einer gewissen absoluten Lichtintensität als gleich hell erscheinen, so erhält die Kurve der einfachen Farben eine ganz andere Gestalt, ähnlich wie in Fig. 19. Die gesättigten Farben Violett und Rot müssen weiter vom Weiß entfernt sein, als ihre weniger gesättigten Komplementärfarben, weil nach dem Urteile des Auges bei der Mischung von Gelbgrün und Violett zu Weiß die Quantität violetten Lichtes viel kleiner ist, als die des gelbgrünen, und wenn das Weiß im Schwerpunkte beider liegen soll, die kleinere Quantität Violett an einem größeren Hebelarme wirken muß, als die größere Lichtmenge des Gelbgrün. Übrigens würden auch hier wieder die Spektralfarben an der Peripherie der Kurve, das Purpur auf einer Sehne stehen müssen, Komplementärfarben an den entgegengesetzten Enden von Sehnen, welche durch den Ort des Weiß gelegt sind, wie bei der kreisförmigen Fig. 16.

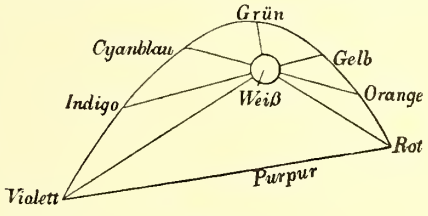


Fig. 19.

Die Zurückführung des Farbenmischungsgesetzes auf Schwerpunktskonstruktionen wurde zuerst von Newton nur als eine Art mathematischen Bildes vorgeschlagen, um die große Menge der Tatsachen dadurch auszudrücken, und er stützte sich nur darauf, daß die Folgerungen aus jener Darstellung qualitativ mit den Erfahrungstatsachen übereinstimmten, ohne daß er quantitative Prüfungen ausgeführt hätte. Dergleichen quantitative Prüfungen sind dagegen in neuester Zeit von Maxwell ausgeführt worden. Er verfertigte sich eine Reihe Kreissektoren von größerem, eine andere von kleinerem Radius, welche mit Pigmenten (Zinnober, hellem Chromgelb, Pariser Grün, Ultramarin, Weiß und Schwarz) überzogen waren, und befestigte dieselben so auf einer rotierenden Scheibe, daß beliebige größere und kleinere Stücke der einzelnen Sektoren sichtbar wurden, und zwar wurde in der Mitte der Scheibe eine andere Zusammenstellung gemacht als am Rande. Die Breite der Sektoren wurde so lange abgeändert, bis beide Farbenmischungen bei schneller Rotation der Scheibe ganz gleich erschienen, dann der Winkel bestimmt, in dem die einzelnen Sektoren sichtbar waren. So lassen sich unzählig viele Farbenzusammenstellungen machen, und das Mischungsgesetz läßt sich an ihnen prüfen. Der Sinn dieser Prüfung läßt sich unserer bisher gewählten Darstellungsweise gemäß folgendermaßen deutlich machen. Man konstruiere eine Farbentafel, in welcher drei von den Farben der Scheibe, z. B. Rot, Grün und Blau, als Grundfarben betrachtet, ihre Helligkeiten gleich der willkürlichen Maßeinheit gesetzt werden. Dann sind bei jedem Mischungsversuche aus diesen drei Farben die angewendeten Helligkeiten derselben gleich dem Bogen ihres Sektors dividiert durch die Kreisperipherie zu setzen. Zuerst wird es möglich sein, aus den drei Farben ein Grau zusammenzusetzen, und gleich zu machen einem aus Schwarz und Weiß zusammengesetzten Grau. Dadurch bestimmt sich die Stelle und Maßeinheit des Weiß in der Farbentafel. Dann wird es möglich sein, aus Rot und Grün einerseits, Gelb, Weiß und Schwarz andererseits zwei gleiche graugelbe Mischungen zu erzeugen, und dadurch nach der oben gegebenen Konstruktionsregel den Ort und die Maßeinheit des Gelb in der Farbentafel zu bestimmen. Sobald dies geschehen ist, läßt sich durch Konstruktion in der

Farbentafel oder Rechnung für jede andere Mischung aus drei von den fünf Farben Rot, Gelb, Grün, Blau, Weiß vollständig berechnen, wie dieselbe aus anderen drei zusammengesetzt werden kann, und am Versuche prüfen, so daß jede solche Prüfung eine Prüfung der Prinzipien ist, auf welche die Schwerpunktskonstruktionen bei der Farbenmischung begründet sind. Maxwell hat die Versuche in guter Übereinstimmung mit dem Gesetze gefunden. Diese Einrichtung der Farbenscheibe würde übrigens auch sehr geeignet sein, um die Farben der Naturkörper durch Zahlen zu definieren.

Wir haben gesehen, daß alle Verschiedenartigkeit des Lichteindrucks als die Funktion dreier unabhängig veränderlicher Größen betrachtet werden kann, und haben bisher als diese drei Veränderlichen 1. die Lichtstärke, 2. den Farbenton und 3. die Sättigung gewählt oder 1. die Quantität Weiß, 2. die Quantität und 3. die Wellenlänge einer Spektralfarbe. Statt dieser drei Variablen kann man aber auch andere drei einführen, und dies ist geschehen, indem man versucht hat, alle Farben als Mischungen von veränderlichen Quantitäten dreier Farben, der sogenannten drei Grundfarben zu betrachten, zu welchen man meistens Rot, Gelb und Blau wählte. Wenn man diese Lehre objektiv auffassen wollte, d. h. behaupten, es gäbe im Spektrum einfache Farben, durch deren Zusammensetzung man einen gleichen Eindruck auf das Auge hervorbringen kann, wie durch jedes beliebige andere einfache oder zusammengesetzte Licht, so wäre dies unrichtig. Es gibt keine solche drei einfachen Farben, durch deren Zusammensetzung man auch nur erträglich die zwischenliegenden Farben des Spektrums nachbilden könnte, welche immer viel gesättigter erscheinen, als die zusammengesetzten Farben. Am wenigsten passen dazu Rot, Gelb und Blau, denn wenn man als Blau eine dem Farbentone des Himmels ähnliche Farbe wählt, und nicht ein dem Grünlichen sich näherndes Blau, so kann man durch Mischung dieser Farben gar kein Grün erhalten; nimmt man ein grünliches Gelb und ein grünliches Blau, so erhält man nur ein sehr weißliches Grün. Diese drei Farben konnten nur so lange gewählt werden, als man, auf die Mischung der Pigmentfarben vertrauend, fälschlich meinte, gelbes und blaues Licht gemischt gebe Grün. Etwas besser würde es gehen, wenn man als Grundfarben Violett, Grün und Rot wählte. Aus Violett und Grün kann man Blau mischen, aber freilich nicht das gesättigte Blau des Spektrums, und aus Grün und Rot kann man ein mattes Gelb zusammensetzen, was sich aber ebenfalls auf den ersten Blick von dem glänzenden Gelb des Spektrums unterscheidet.

Denken wir uns die Farben nach der oben geschilderten Methode in eine Farbentafel eingetragen, so ist aus der dort gegebenen Konstruktionsregel klar, daß alle Farben, welche aus drei gegebenen zu mischen sind, in dem Dreieck liegen müssen, dessen Ecken mit dem Orte der drei Grundfarben in der Farbentafel zusammenfallen. So würde in dem nebenstehenden Farbenkreise Fig. 20, in welchem die Farben durch ihre Anfangsbuchstaben bezeichnet sind (I = Indigblau, C = Cyanblau), das Dreieck *R C G* alle Farben umfassen, welche aus Rot, Cyanblau und Gelb zusammenzusetzen sind. Dabei fallen, wie man sieht, zwei große Stücke des Kreises weg, es würde nur sehr weißliches Violett und sehr weißliches Grün herzustellen sein. Wählten wir aber statt Cyanblau die Farbe des blauen Himmels, das Indigblau, so würde das Grün ganz wegfallen. Das Dreieck *V R Gr* enthält die aus Violett, Rot, Grün mischbaren Farben, und würde schon eine größere Zahl der vorhandenen Farben vertreten. Aber wie

man in der Figur sieht, fehlen noch immer beträchtliche Segmente des Kreises, übereinstimmend mit den angeführten Erfahrungen über Mischung von Spektralfarben, aus denen eben folgt, daß die Grenzkurve der Farbentafel eine von den Seiten des Dreiecks beträchtlich abweichende krumme Linie sein müsse.

Die objektive Natur dreier Grundfarben hat Brewster zu verteidigen gesucht, indem er behauptete, für jeden Grad der Brechbarkeit der Lichtstrahlen existierten drei verschiedene Arten Licht, rotes, gelbes und blaues, welches nur in verschiedenen Verhältnissen gemischt sei, so daß dadurch die verschiedenen Farben des Spektrums entständen. Die Spektralfarben seien also noch zusammengesetzt aus dreierlei qualitativ verschiedenen Lichtarten, deren Strahlen aber für jede einzelne einfache Farbe denselben Grad von Brechbarkeit hätten. Durch absorbierende farbige Medien sollte sich nach Brewster Licht aller drei Grundfarben in den verschiedenen einfachen Farben nachweisen lassen. Daß diese letztere Behauptung, auf welcher seine ganze Beweisführung beruht, nicht richtig sei, ist schon im vorigen Paragraphen besprochen.

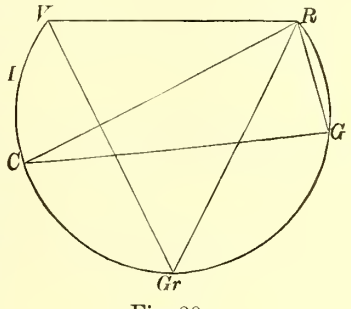


Fig. 20.

Wenn wir von Brewsters Hypothese absehen, hat es überhaupt keinen Sinn, in objektiver Bedeutung von drei Grundfarben zu sprechen. Denn so lange es auf rein physikalische Verhältnisse ankommt und das menschliche Auge aus dem Spiele bleibt, sind die Eigenschaften des gemischten Lichts immer nur abhängig von den Mengenverhältnissen, in denen das Licht sämtlicher einzelner Wellenlängen darin vorkommt. Eine Reduktion der Farben auf drei Grundfarben kann immer nur subjektive Bedeutung haben, es kann sich nur darum handeln, die Farbenempfindungen auf drei Grundempfindungen zurückzuführen. In diesem Sinne hat Th. Young das Problem richtig aufgefaßt, und in der Tat gibt seine Annahme eine außerordentlich einfache und klare Übersicht und Erklärung sämtlicher Erscheinungen der physiologischen Farbenlehre. Th. Young nimmt an:

1. Es gibt im Auge drei Arten von Nervenfasern. Reizung der ersten erregt die Empfindung des Rot, Reizung der zweiten die des Grün, Reizung der dritten die Empfindung des Violett,
2. Objektives homogenes Licht erregt diese drei Arten von Fasern je nach seiner Wellenlänge in verschiedener Stärke. Die rotempfindenden Fasern werden am stärksten erregt von dem Lichte größter Wellenlänge, die grünempfindenden von dem Lichte mittlerer Wellenlänge, die violettempfindenden von dem Lichte kleinster Wellenlänge. Indessen ist dabei nicht ausgeschlossen, muß vielmehr zur Erklärung einer Reihe von Erscheinungen angenommen werden, daß jede Spektralfarbe alle Arten von Fasern erregt, aber die einen schwach, die anderen stark. Denken wir uns in Fig. 21 in horizontaler Richtung die Spektralfarben in ihrer natürlichen Reihenfolge aufgetragen, anfangend von Rot *R* bis zum Violett *V*, so können die drei Kurven etwa die Erregungsstärke der drei Arten von Fasern darstellen, Nr. 1 die der rotempfindenden, Nr. 2 der grünempfindenden, Nr. 3 der violettempfindenden.

Das einfache Rot erregt stark die rotempfindenden, schwach die beiden andern Faserarten; Empfindung: rot.

Das einfache Gelb erregt mäßig stark die rot- und grünempfindenden, schwach die violetten; Empfindung: gelb.

Das einfache Grün erregt stark die grünempfindenden, viel schwächer die beiden anderen Arten; Empfindung: grün.

Das einfache Blau erregt mäßig stark die grün- und violettempfindenden, schwach die roten; Empfindung: blau,

Das einfache Violett erregt stark die gleichnamigen, schwach die andern Fasern; Empfindung: violett.

Erregung aller Fasern von ziemlich gleicher Stärke gibt die Empfindung von Weiß oder weißlichen Farben.

Vielleicht nimmt bei dieser Hypothese zunächst mancher daran Anstoß, daß die Zahl der vorauszusetzenden Nervenfasern und Nervenendigungen verdreifacht werden muß, im Vergleich mit der gewöhnlichen Annahme, wo man jede einzelne Nervenfaser alle möglichen Farbenerregungen leiten läßt. Ich glaube aber nicht, daß in dieser Beziehung die Annahme von Young mit den anatomischen Tatsachen in Widerspruch steht; da wir über die Zahl der leitenden Fasern nichts wissen, und noch eine Menge mikroskopischer Elemente (Zellen, Körner, Stäbchen) vorhanden sind, denen wir bisher keine spezielle Funktion anweisen konnten. Andererseits ist dies auch nicht das Wesentliche der Hypothese von Young. Das scheint mir vielmehr darin zu liegen, daß die Farbenempfindungen vorgestellt werden als zusammengesetzt aus drei voneinander vollständig unabhängigen Vorgängen in der Nervensubstanz. Diese Unabhängigkeit zeigt sich nicht nur bei den hier vorliegenden Erscheinungen, sondern auch bei denen der Ermüdung des Sehnervenapparates. Es würde nicht gerade nötig sein, verschiedene Nervenfasern für diese verschiedenen Empfindungen anzunehmen. Man würde dieselben Vorteile, welche die Hypothese von Young für die Erklärungen bietet, gewinnen, wenn man die Annahme machte, daß innerhalb jeder einzelnen Faser dreierlei voneinander verschiedene und voneinander unabhängige Tätigkeiten auftreten könnten. Da aber die ursprüngliche von Young aufgestellte Form dieser Hypothese eine größere Bestimmtheit der Vorstellung und des Ausdrucks gibt, als eine solche Modifikation desselben erlauben würde, so wollen wir sie, wenn auch nur im Interesse der Darstellung, in ihrer ursprünglichen handgreiflicheren Gestalt beibehalten. Es kommt noch hinzu, daß die physikalischen Erscheinungen der Nervenerregung, nämlich die elektromotorischen, uns in sensiblen wie in motorischen Nerven nichts von einer solchen Verschiedenartigkeit der Tätigkeit merken lassen, wie sie vorhanden sein muß, wenn jede Sehnervenfaser sämtliche Farbenempfindungen leiten soll. Durch Youngs Hypothese wird es möglich, auch in dieser Beziehung die einfachen Vorstellungen über den Mechanismus der Reizung und ihre Fortleitung, die wir uns zunächst durch das Studium der Phänomene an den motorischen Fasern gebildet haben, direkt auf den Sehnerven zu übertragen, was nicht anginge, wenn wir uns vorstellten, daß jede

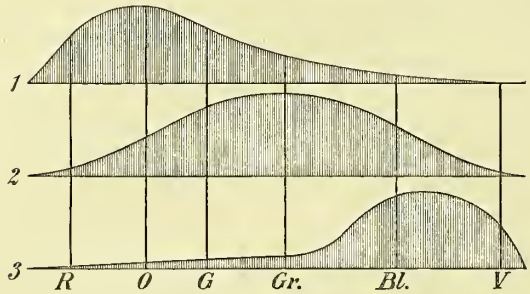


Fig. 21.

Sehnervenfaser in drei qualitativ verschiedene Reizungszustände solle geraten können, die sich gegenseitig nicht störten. Youngs Hypothese ist nur eine speziellere Durchführung des Gesetzes von den spezifischen Sinnesenergien. Wie Tastempfindung und Gesichtsempfindung des Auges nachweislich verschiedenen Nervenfasern zukommt, wird hier dasselbe auch für die Empfindung der verschiedenen Grundfarben angenommen.

Die Wahl der drei Grundfarben hat zunächst etwas Willkürliches. Es könnten beliebig jede drei Farben gewählt werden, aus denen Weiß zusammengesetzt werden kann. Young ist wohl durch die Rücksicht geleitet worden, daß die Endfarben des Spektrums eine ausgezeichnete Stellung zu beanspruchen scheinen. Würden wir diese nicht wählen, so müßte eine der Grundfarben ein purpurner Farbenton sein, und die ihr entsprechende Kurve in Fig. 21 zwei Maxima haben, eines im Rot, eines im Violett. Es wäre dies eine kompliziertere, aber nicht unmögliche Voraussetzung. So viel ich sehe, gibt es bisher kein anderes Mittel, eine der Grundfarben zu bestimmen, als die Untersuchung der Farbenblinden. Inwieweit diese Youngs Hypothese wenigstens für das Rot bestätigt, wird sich später zeigen.

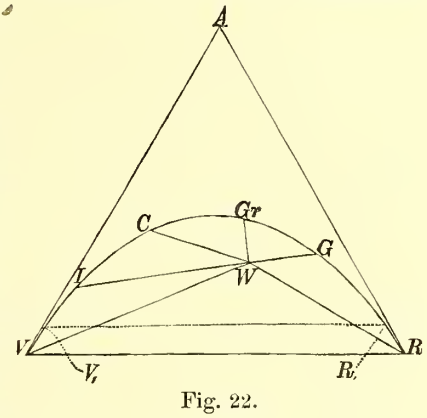


Fig. 22.

Daß die den drei Grundfarben entsprechenden Spektralfarben nicht bloß die gleichnamigen Nervenfasern erregen, sondern in geringerem Maße auch die anderen, beweisen für das Grün wenigstens schon die Ergebnisse der Farbenmischung. Denn denken wir uns alle aus den drei Grundfarben zusammengesetzten Farbenempfindungen nach der Newtonschen Regel in der Ebene geordnet, so wird die Farbenfläche, wie aus dem früher Gesagten folgt, ein Dreieck sein. Dieses Dreieck muß die in Fig. 22 dargestellte Farbenfläche, welche alle aus Spektralfarben mischbaren Farben umfaßt, in sich schließen. Es würde dies geschehen können, wenn wir, wie in Fig. 22, die Empfindung des reinen Grün nach $A$ hin verlegten, übrigens das spektrale Rot und Violett $R$ und $V$ als reine Grundfarben voraussetzten. Dann wäre $AVR$ das Farbendreieck, welches alle möglichen Farbenempfindungen in sich schlösse. Es würde, wie gesagt, diese Annahme den Tatsachen der Farbenmischung genügen. Andererseits aber machen einige später zu erwähnende Tatsachen, nämlich die der Farbenblindheit, der Änderung des Farbentons durch vermehrte Intensität des Lichts, der Nachbilder die Annahme notwendig, daß auch das spektrale Rot und Violett nicht einer einfachen Empfindung einer Grundfarbe entsprechen, sondern einer schwach gemischten Empfindung. Wir würden also die Orte des spektralen Rot und Violett in dem Farbendreieck Fig. 22 etwa nach $R_,$ und $V_,$ zu verlegen haben, und $ICGR_,V_,$ würde dann die ganze Menge der möglichen Farben des objektiven Lichtes umfassen.

Es folgt nun hieraus, daß es noch eine Reihe von gesättigteren Farbenempfindungen geben müsse, als diejenigen sind, welche beim gewöhnlichen Zustande des Auges durch objektives Licht, selbst durch das des Spektrums, hervorgerufen werden. In der Fig. 22 sind die durch äußeres Licht im normalen Auge hervorgerufenen Farben umschlossen durch die Kurve und die gerade

Linie $V_, R_,$, der Rest des Dreiecks entspricht Farbenempfindungen, die nicht unmittelbar durch äußeres Licht erzeugt werden können. Da die letzteren alle weiter vom Weiß abstehen als die Spektralfarben, so müssen sie gesättigter sein als selbst letztere, welche die gesättigtesten objektiven Farben sind, die wir kennen. Und in der Tat werden wir in der Lehre von den Nachbildern durch Ermüdung des Auges für die Komplementärfarbe dergleichen Farbenempfindungen erzeugen lernen, gegen welche die Spektralfarben weißlich erscheinen.

Die oben angeführte Tatsache, daß die verschiedenen Spektralfarben einen verschiedenen Grad von Farbensättigung zeigen, erklärt sich leicht aus dieser Theorie.

Von großem Interesse für die Theorie der Farbenempfindungen sind die Wahrnehmungen solcher Augen, welche weniger Farben als die gewöhnlichen Augen unterscheiden (Farbenblindheit *Achromatopsia, Achrupsia*). A. Seebeck hat nachgewiesen, daß es zwei Klassen von Farbenblinden gibt. Innerhalb jeder dieser Klassen machen die einzelnen Augen dieselben Verwechslungen zwischen verschiedenen Farben, und man findet nur Unterschiede der Stärke in ihrem Übel. Dagegen erkennt jede Klasse die meisten Verwechslungen, welche Individuen der anderen Klasse gemacht haben.

Am häufigsten scheinen, namentlich in England, die Fälle von Seebecks zweiter Klasse zu sein, deren Übel auch oft nach dem bekannten Chemiker J. Dalton, der zu ihnen gehörte und zuerst eine genauere Untersuchung dieses Zustandes gab, Daltonismus (*Anerythropsia* nach Goethe) genannt wird.* Da die englischen Naturforscher gegen diese Art, den Namen ihres berühmten Landsmanns durch einen seiner Fehler zu verewigen, Einsprache erheben, wollen wir den Zustand Rotblindheit nennen. Individuen, bei denen dieser Zustand vollständig entwickelt ist, sehen im Spektrum nur zwei Farben, die sie meist Blau und Gelb nennen. Zum letzteren rechnen sie das ganze Rot, Orange Gelb und Grün. Die grünblauen Töne nennen sie grau, den Rest blau. Das äußerste Rot, wenn es lichtschwach ist, sehen sie gar nicht, wohl aber wenn es intensiv ist. Sie zeigen deshalb die rote Grenze des Spektrums gewöhnlich an einer Stelle an, wo die normalen Augen noch deutlich schwaches Rot sehen. Unter den Körperfarben verwechseln sie das Rot (d. h. Zinnoberrot und rötlich Orange) mit Braun und Grün, wobei dem normalen Auge im allgemeinen die verwechselten roten Farbentöne viel heller erscheinen, als die braunen und grünen; Goldgelb unterscheiden sie nicht von Gelb, Rosarot nicht von Blau. Alle Mischungen verschiedener Farben dagegen, welche dem normalen Auge gleich erscheinen, erscheinen auch den Rotblinden gleich. Schon J. Herschel[1] stellt in bezug auf Daltons Fall die Ansicht auf, daß alle Farben, welche er unterschiede, aus zwei statt aus drei Grundfarben zusammengesetzt gedacht werden könnten. Diese Meinung ist nun neuerdings durch Maxwell mittels seiner Methode, die Farbenmischungen auf dem Farbenkreisel zur Messung zu benutzen, bestätigt worden. Für das gesunde Auge läßt sich, wie wir sahen,

[1] In einem Briefe, der angeführt ist in G. Wilson, *On Colour Blindness*. Edinburgh 1855. p. 60.

* Nach neueren Feststellungen ist Seebecks zweite Form der Farbenblindheit, die von Helmholtz sogenannte „Grünblindheit" die häufigere, sie wird nur öfter übersehen als die „Rotblindheit", weil ihre Symptome etwas weniger auffällig sind. Über neue Vorschläge zur Nomenklatur der Farbenblindheitsformen vergl. den Abschnitt über Farbenblindheit in den Zusätzen am Schluß dieses Bandes. N.

zwischen jeder vorkommenden Farbe, drei passend gewählten Grundfarben, ferner Weiß und Schwarz eine Farbengleichung herstellen. Bei den Rotblinden braucht man, wovon ich mich selbst überzeugt habe, außer Weiß und Schwarz nur zwei Farben (z. B. Gelb und Blau), um mit jeder anderen Farbe die Farbengleichung auf der rotierenden Scheibe herzustellen. Ich benutzte bei meinen Versuchen mit Herrn M., Schüler der polytechnischen Schule, der an physikalische Untersuchungen gewöhnt war, und sich ziemlich empfindlich gegen die Farbenunterschiede zeigte, die für sein Auge noch vorhanden waren, als Hauptfarben Chromgelb und Ultramarin.

Mit Rot (etwa dem des Siegellacks) war ihm identisch eine Mischung von 35° Gelb, 325° Schwarz, die für das normale Auge ein dunkles Olivengrün gab.

Mit Grün identisch (im Farbenton etwa der Linie *E* entsprechend) ergibt sich aus den Versuchen eine Mischung von 327° Gelb, 33° Blau, für das normale Auge Graugelb. Mit Grau identisch 165° Gelb und 195° Blau, für das normale Auge ein schwach rötliches Grau.

Da man nun aus Rot, Gelb, Grün, Blau alle anderen Farbentöne würde mischen können, so ergibt sich, daß für Herrn M. alle aus Gelb und Blau gemischt werden könnten.

Aus Grassmanns Sätzen über Farbenmischung folgt übrigens unmittelbar, wenn man sie auf ein Auge anwendet, welches Rot mit Grün verwechselt, daß die Farbentöne, welche es überhaupt unterscheidet, alle aus zwei anderen Farben, etwa Gelb und Blau, zu mischen seien. Denn wenn Rot und Grün identisch erscheinen, müssen auch notwendig alle Mischfarben aus Rot und Grün identisch erscheinen. Da gleich aussehende Farben gemischt gleich aussehende Mischfarben geben, muß ferner jede Mischung einer bestimmten Quantität Gelb mit einer solchen Quantität irgend einer der Mischfarben aus Rot und Grün, die für das farbenblinde Auge gleiches Aussehen hat, für dieses Auge gleich aussehende Mischfarben geben. Eine der Mischfarben aus Rot und Grün ist aber für das gesunde Auge auch durch Gelb und Blau herzustellen, und kann daher für das farbenblinde Auge statt sämtlicher Mischfarben aus Rot und Grün substituiert werden. Daraus folgt, daß sämtliche Mischfarben aus Gelb, Rot und Grün für das letztere Auge auch aus Gelb und Blau herzustellen sind, und dasselbe läßt sich ebenso für sämtliche Mischungen aus Blau, Rot und Grün beweisen. Da endlich aus Rot, Gelb, Grün, Blau sämtliche Farbentöne für das gesunde Auge mischbar sind, sind es für das farbenblinde alle Farbentöne aus Gelb und Blau.

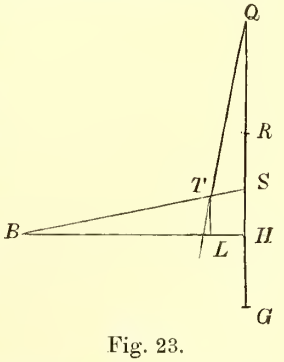


Fig. 23.

Sind die Farben in der Ebene nach den Prinzipien der Schwerpunkts-Konstruktion geordnet, so müssen alle solche Farben, welche den Farbenblinden bei passender Lichtstärke gleich erscheinen, in einer geraden Linie liegen, da auf der Verbindungslinie zweier Farben ihre Mischfarben liegen, und diese von gleichem Farbenton erscheinen müssen, wenn die ursprünglichen Farben gleich aussehen. Ferner läßt sich zeigen, daß alle diese geraden Linien entweder parallel sind, oder sich in einem Punkte schneiden, und daß die diesem Schneidepunkte angehörige Farbe dem farbenblinden Auge unsichtbar sein muß.

Es erscheine dem Farbenblinden die Quantität $r$ der in $R$ Fig. 23 (S. 123) befindlichen Farbe gleich der Quantität $g$ der in $G$ befindlichen. Nun ist

$$r = nr + (1 - n)r.$$

Mit der Menge $nr$ der Farbe $R$ ist gleich aussehend die Menge $ng$ der Farbe $G$, also wenn $n$ ein echter Bruch, ist gleich aussehend die Menge $r$ der Farbe $R$ mit der Mischung $(1 - n)r$ von $R$ und $ng$ von $G$. In der Farbenfläche ist diese Mischfarbe zu finden im Punkte $S$ der Linie $RG$, wenn

$$RS : SG = ng : (1 - n)r \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

und die Quantität $s$ der so gewonnenen Mischfarbe ist

$$s = ng + (1 - n)r.$$

Das Aussehen dieser Quantität $s$ von der Farbe $S$ ist für das farbenblinde Auge unabhängig von dem Werte von $n$.

Wenn wir nun die Quantität $b$ der Farbe $B$ mit der Quantität $s$ der Farbe $S$ mischen, so erhalten wir eine Mischfarbe, deren Aussehen für das farbenblinde Auge unabhängig von der veränderlichen Größe $n$ ist. Der Ort der Farbe sei $T$, ihre Menge $t$, so ist

$$t = b + s = b + ng + (1 - n)r$$

$$TS : BT = b : s = b : [ng + (1 - n)r] \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1\,a).$$

Fällen wir aus $B$ das Lot $BH$ auf $RG$ und aus $T$ das Lot $TL$ auf $BH$, nennen wir

$$LH = x \qquad BH = h$$
$$TL = y \qquad HG = a$$
$$RG = c$$

so ist nach 1 a)

$$\frac{x}{h} = \frac{LH}{BH} = \frac{TS}{BS} = \frac{b}{b + ng + (1 - n)r} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1\,b)$$

$$\frac{y}{h - x} = \frac{TL}{BL} = \frac{SH}{BH} = \frac{SG - a}{h}.$$

Nun folgt aus 1)

$$SG = c \cdot \frac{(1 - n)r}{ng + (1 - n)r},$$

also

$$\frac{y}{h - x} = \frac{(c - a)(1 - n)r - ang}{h[ng + (1 - n)r]} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1\,c).$$

Wenn man aus $1_b$ und $1_c$ die veränderliche Größe $n$ eliminiert, erhält man eine Gleichung zwischen den rechtwinkeligen Koordinaten des Punktes $T$, nämlich

$$0 = ybh(g - r) - x[crg + br(c - a) + abg] + bh[(c - a)r + ag] \quad 1\,d).$$

Da dies eine lineare Gleichung zwischen den rechtwinkeligen Koordinaten $x$ und $y$ ist, so liegen die betreffenden Orte $T$ der für das farbenblinde Auge gleichaussehenden Mischfarben in einer geraden Linie. Es sei $TQ$ diese gerade Linie, $Q$ ihr Schneidepunkt mit der Richtung $RG$, so ist $QH = y_0$ der Wert, welchen $y$ annimmt, wenn man $x = 0$ setzt

$$y_0 = \frac{(c - a)r + ag}{r - g} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1\,e).$$

Dieser Wert von $y_0$ ist unabhängig von der Quantität $b$ der zugemischten Farbe $B$, also schneiden sich alle geraden Linien, welche gleich aussehende Mischfarben von $R$, $G$ und $B$ enthalten, in demselben Punkte $Q$, oder sind sich parallel, wenn $r = g$ und also $y_0$ unendlich.

Die Entfernung des Schneidepunktes $Q$ vom Punkte $R$ ist

$$y_0 - c + a = \frac{cg}{r-g} = QR \quad \ldots \ldots \ldots \quad 1f).$$

Mischen wir eine Quantität $q$ der Farbe $Q$ mit der Quantität $g$ der Farbe $G$, so daß die Farbe $R$ entsteht, so muß sein

$$\frac{QR}{RG} = \frac{g}{q}$$

oder nach $1_f$, da $RG = c$

$$\frac{g}{r-g} = \frac{g}{q}$$

$$q = r - g.$$

Die Quantität der Mischfarbe $R$ wird dann

$$r = g + q.$$

Da nun $r$ nach der Voraussetzung dem farbenblinden Auge gleichaussehend ist mit $g$, die Quantität $q = r - g$ aber im allgemeinen nicht Null ist, so folgt daraus, daß das farbenblinde Auge die Farbe $Q$ gar nicht empfinden kann.

Der Schneidepunkt der geraden Linien, welche die gleichaussehenden Farben enthalten, fällt also in den Ort der Farbe, welche dem farbenblinden Auge fehlt.

In der Youngschen Hypothese kann die dem farbenblinden Auge unsichtbare Farbe natürlich nur eine der Grundfarben sein, denn wenn alle Grundfarben empfunden werden, kann keine andere Farbe, die ja aus den Grundfarben nur zusammengesetzt ist, fehlen. Wenn man nun diejenigen Farben aufsucht, welche dem Weiß (beziehlich Grau) gleich erscheinen, so werden dies Farben sein, die für das gesunde Auge entweder Farben vom Farbentone der fehlenden Grundfarbe oder von ihrer Komplementärfarbe sind, in verschiedenen Graden mit Weiß gemischt. Denn alle diese dem Weiß gleich aussehenden Farben müssen auf einer geraden Linie liegen. Jede gerade Linie aber, die in der Farbenfläche durch den Ort des Weiß gezogen ist, enthält in jeder ihrer beiden Hälften Farben von gleichem Farbentone und verschiedenen Graden der Sättigung. Die Farben der einen Hälfte sind aber denen der anderen komplementär. Jede solche Linie, welche gleich aussehende Farben enthält, muß aber auch, wie eben bewiesen, durch den Ort der fehlenden Grundfarbe gehen, folglich in ihrer einen Hälfte die Farben vom gleichen Farbentone mit der Grundfarbe enthalten. Bei den Versuchen, welche ich mit Herrn M. anstellte, zeigte sich, daß dem reinen Grau gleich erschien ein Rot, welches sehr nahe dem äußersten Rot des Spektrums im Farbentone entsprach (38° Ultramarin, 322° Zinnoberrot), vielleicht ein wenig nach der Seite des Purpur abwich, und ein entsprechendes komplementäres Blaugrün (59° Ultramarin, 301° Pariser Grün). Maxwell hat ähnlich gefunden für das Rot 6% Ultramarin, 94% Zinnober, für das Grün 40 Ultramarin, 60 Pariser Grün. Da nun außerdem das Rot bei gleicher Helligkeit für normale Augen viel dunkler erschien, als das Grau und

Grün, so kann kein Zweifel bleiben, daß das Rot und nicht das Grün der fehlenden Farbe entspricht. Die Rotblindheit würde also nach Youngs Hypothese für eine Lähmung der rotempfindenden Nerven zu erklären sein.

Wenn nun wirklich ein dem äußersten Rot des Spektrums nahe stehendes Rot die eine Grundfarbe ist, so können die beiden anderen wenigstens nicht bedeutend von dem von Young gewählten Grün und Violett abweichen.

Daraus würde nun folgen, daß die Rotblinden nur Grün, Violett und ihre Mischung das Blau empfinden. Das spektrale Rot, welches nur schwach die grünempfindenden, fast gar nicht die violettempfindenden Nerven zu erregen scheint, müßte ihnen danach als gesättigtes, lichtschwaches Grün erscheinen, dem schon merkliche Mengen der anderen Farben beigemischt sein müssen. Lichtschwaches Rot, welches die rotempfindenden Nerven der normalen Augen noch genügend erregt, erregt dagegen ihre grünempfindenden Nerven nicht mehr genügend, und erscheint ihnen deshalb schwarz.

Spektrales Gelb wird als lichtstarkes gesättigtes Grün erscheinen, und da es eben die lichtstärkere und gesättigte Abstufung dieser Farbe bildet, erscheint es erklärlich, daß danach die Rotblinden den Namen der Farbe wählen, und alle diese eigentlich grünen Töne Gelb nennen.

Grün wird schon im Vergleich zu den vorigen eine Einmischung von der anderen Grundfarbe zeigen, also eine zwar lichtstärkere aber weißliche Abstufung derselben Farbe sein wie Rot und Gelb. Die größte Lichtintensität des Spektrums erscheint den Rotblinden nach den Beobachtungen von Seebeck auch nicht wie normalen Augen im Gelb, sondern im Grünblau.* In der Tat, wenn die Erregung der grünempfindenden Nerven, wie wir voraussetzen müssen, im Grün am stärksten ist, wird für die Rotblinden das Maximum der gesamten Erregung etwas nach der Seite des Blau fallen, weil hier die Erregung der violettempfindenden Nerven steigt. Weiß im Sinne der Rotblinden ist natürlich eine Mischung ihrer beiden Grundfarben in einem bestimmten Verhältnis, welche uns grünblau erscheint, daher sie denn auch die Übergangsstufen im Spektrum von Grün zu Blau für graue Farben erklären.

Weiter im Spektrum gewinnt die zweite Grundfarbe das Übergewicht, die sie Blau nennen, weil das Indigblau, wenn auch in ihrem Sinne noch etwas weißlich, noch durch seine Lichtstärke ihnen ein mehr in die Augen fallender Repräsentant dieser Farbe sein wird als das Violett. Sie erkennen den Unterschied im Aussehen zwischen Blau und Violett. Der von Seebeck untersuchte H. wußte die Grenze zu zeigen, erklärte aber, er würde das Violett lieber Dunkelblau nennen. Übrigens müssen ihnen die blauen Töne ziemlich ebenso erscheinen, wie den normalen Augen, weil hier auch für diese die Einmischung des Rot sehr klein sein wird.

Da ihnen alle diese Farben des Spektrums noch gewisse, wenn auch feinere Unterschiede zeigen müssen, ist es erklärlich, daß sie bei größerer Aufmerksamkeit und Übung auch wohl lernen, sehr gesättigte Farben richtig zu benennen. Bei weißlicheren Farben müssen aber die genannten Unterscheidungsmerkmale sie im Stich lassen, da können sie sich der Verwechslung nicht entziehen.

Was nun die andere Klasse der Farbenblinden, Seebecks erste Klasse betrifft, so liegen über diese noch keine genügende Beobachtungen vor, um

* Richtiger: im Gelbgrün. N.

ihren Zustand vollständig zu definieren. Nach Seebecks Angaben unterscheiden sie sich von den Rotblinden dadurch, daß sie leicht und sicher über die Übergänge zwischen Violett und Rot urteilen, die jenen gleichmäßig als Blau erscheinen. Dagegen machen sie auch Verwechslungen, zwischen Grün, Gelb, Blau und Rot. Wenn beide Klassen denselben Farbenton mit Grün verwechseln, so wählen die Individuen dieser Klasse ein gelberes Grün als die Rotblinden. Sie zeigen keine Unempfindlichkeit gegen das äußerste Rot, und verlegen die größte Helligkeit des Spektrums in das Gelb.* Auch sie unterscheiden nur zwei Farbentöne im Spektrum, die sie (wahrscheinlich ziemlich richtig) Blau und Rot nennen. Danach kann man vermuten, daß ihr Übel in einer Unempfindlichkeit der grünempfindenden Nerven besteht, worüber aber weitere Untersuchungen wünschenswert sind.

Außer der gänzlichen Unempfindlichkeit können natürlich auch noch alle möglichen Grade verminderter Empfindlichkeit der einen oder anderen Nerven vorkommen, und zu verschiedenen Graden der Unfähigkeit, Farben zu unterscheiden, Veranlassung geben. Wilson und Tyndall haben auch Fälle berichtet, wo das Übel nicht angeboren war, sondern plötzlich eintrat, nach schweren Kopfverletzungen und Anstrengungen des Auges.

Was die Untersuchung Farbenblinder betrifft, so wird durch Fragen, wie sie diese oder jene Farbe nennen, natürlich nur außerordentlich wenig ermittelt werden, denn die Farbenblinden befinden sich in der Lage, das System von Namen, welches für die Empfindungen des normalen Auges zurecht gemacht ist, auf ihre Empfindungen anwenden zu müssen, für die es nicht paßt. Es paßt nicht nur nicht, weil es zu viele Namen für Farbentöne enthält, sondern in der Reihe der Spektralfarben bezeichnen wir Unterschiede als solche des Farbentons, die für die Farbenblinden nur Unterschiede der Sättigung oder der Lichtstärke sind. Ob das, was sie Gelb und Blau nennen, unserem Gelb und Blau entspricht, ist mehr als zweifelhaft. Deshalb erfolgen ihre Antworten auf Fragen über Farben meist langsam und verlegen, und erscheinen uns verwirrt und widersprechend.

Viel besser, aber doch noch sehr unzureichend ist die Methode von Seebeck, den Farbenblinden eine Auswahl gefärbter Papiere oder Proben von Stickwolle zu geben mit der Aufforderung, sie nach ihrer Ähnlichkeit zusammen zu ordnen. Aber die Anzahl der Farbenproben müßte ungeheuer groß sein, wenn darin die charakteristisch verwechselten Farbentöne auch genau gerade in der nötigen Vermischung mit Weiß, und der nötigen Helligkeit vorkommen sollen, daß die vollständige Gleichheit für das farbenblinde Auge erzielt wird. So lange aber nur Ähnlichkeit da ist, wird man sich schwer darüber verständigen, ob die Differenz eine des Farbentons, oder der Sättigung, oder der Helligkeit ist. Man wird also nur durch Zufall einige wenige bestimmte Resultate erhalten können.

Dagegen erlaubt der nach Maxwells Methode eingerichtete Farbenkreisel schnell die notwendigen Data mit großer Genauigkeit zu erhalten, weil man sehr leicht eine Reihe von Farben durch Mischung erzeugen kann, die dem farbenblinden Auge vollkommen gleich erscheinen. Dabei ist die Hauptsache, die den Grundcharakter des Übels bezeichnet, zu ermitteln, welche zwei Farben mit reinem Grau, wie man es durch die Mischung von Weiß und Schwarz auf dem Kreisel erhält, verwechselt werden. Eine davon, die dann dem farben-

* Etwas gegen das Orange hin, etwa bei der Wellenlänge 600 $\mu\mu$. N.

blinden Auge verhältnismäßig viel dunkler als dem normalen erscheint, ist die fehlende Grundfarbe. Dabei wird sich auch leicht ermitteln lassen, ob noch ein gewisser Rest von Empfindlichkeit für die fehlende Grundfarbe vorhanden ist, oder nicht.

Will man die hier auseinander gesetzte Theorie prüfen, so muß man ferner bestimmen, ob jede gegebene Farbe, namentlich die Hauptfarben des Spektrums, für den Farbenblinden aus zwei passend gewählten Farben zusammengesetzt werden könne.

G. Wilson hat namentlich darauf aufmerksam gemacht, wie gefährlich die Farbenblindheit auf Schiffen und Eisenbahnzügen werden könne, wo es darauf ankommt, farbige Signale zu erkennen. Er fand im Durchschnitt einen Farbenblinden unter 17,7 Personen.

Schließlich muß noch erwähnt werden, daß Farben vom Auge nur dann unterschieden werden, wenn sie ein Feld von gewisser Ausdehnung bedecken, und eine gewisse Menge farbigen Lichts in das Auge fällt. Je weiter das farbige Feld nach den Grenzen des Gesichtsfeldes und der Netzhaut hin liegt, desto größer muß es sein, damit seine Farbe noch erkannt werden könne. Ist das farbige Feld zu klein, so erscheint es auf hellerem Grunde grau oder schwarz, auf dunklerem Grunde grau oder weiß. Indessen kann auch die Farbe von unendlich kleinen Feldern erkannt werden, wenn die Menge des Lichts, die sie aussenden, endlich ist, wie z. B. bei den Fixsternen, deren Farben wir unterscheiden. Nach den Versuchen von Aubert[1] erschien ein Quadrat von 1 Millimeter Seite, wenn es blau auf weißem Grunde war, in 10 Fuß Entfernung schwarz, ebenso ein rotes in 20 Fuß Entfernung. Ein gelbes und grünes verschwammen schon in 12 Fuß vollständig mit dem weißen Grunde. Auf schwarzem Grunde dagegen erschienen das grüne und gelbe Quadratmillimeter in 16 Fuß Entfernung als graue Punkte, das rote bei 12 Fuß. Blau erschien blau, wenn es überhaupt gesehen wurde.

Nach demselben Beobachter verschwindet die Farbe von farbigen Quadraten in 200 mm Entfernung im Mittel unter folgenden Abweichungswinkeln von der Gesichtslinie:

| | Rot | | | | Blau | | | | Gelb | | | | Grün | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Seite des Quadrats . | 1. | 2. | 4. | 8. | 1. | 2. | 4. | 8. | 1. | 2. | 4. | 8. | 1. | 2. | 4. | 8. |
| Weißer Grund . . | 16° | 19° | 26° | 37° | 15° | 22° | 36° | 49° | 21° | 31° | 44° | | 20° | 36° | 44° | 50° |
| Schwarzer Grund . | 30 | 32 | 42 | 53 | 36 | 48 | 54 | 72 | 30 | 32 | 49 | 47° | 24 | 27 | 35 | 45 |
| Mittel . . . . . | 23 | 26 | 34 | 45 | 26 | 35 | 45 | 61 | 26 | 32 | 42 | | 22 | 32 | 40 | 47 |

Dabei ist zu bemerken, daß der Farbenton desto eher verschwindet, je stärker die Verschiedenheit der Helligkeit von der des Grundes ist, woher die Unterschiede zwischen den Resultaten auf weißem und schwarzem Grunde rühren. Das Blau war die dunkelste der von Aubert benutzten Farben.

Ehe die Farben ganz verschwinden, erleiden sie noch eine ähnliche Änderung des Farbentons, wie bei der Vermehrung ihrer Intensität. Rot und Grün werden nämlich sehr deutlich Gelb, Blau scheint direkt in Grauweiß überzugehen, und in den Mischungen aus Blau und Rot, dem Purpur, überwiegt an

[1] Archiv für Ophthalmologie. Bd. III. Abt. II. S. 60.

den Grenzen des Gesichtsfeldes das Blau. So erklärte schon Purkinje, daß Purpur an der äußersten Grenze blau erscheine, wenn es weiter in das Gesichtsfeld hineinrückt, violett werde, endlich seine eigentliche Farbe erhalte. Ich selbst sehe ebenfalls Rosarot an den Grenzen als bläuliches oder violettes Weiß. Am auffallendsten ist die zuletzt erwähnte Erscheinung bei Mischungen aus je zwei einfachen Farben. Wenn man z. B. nach der weiter unten zu beschreibenden Methode ein kleines farbiges Feld mit einfachem Rot und Grünblau so beleuchtet, daß es im direkten Sehen weiß erscheint, so erscheint es indirekt gesehen schon in geringer Entfernung vom Fixationspunkte grünblau. Es scheint nach diesen Versuchen, daß die Netzhaut am Rande gegen blaues und grünes Licht empfindlicher ist als gegen rotes. Sie nähert sich dort einigermaßen dem Zustande der Rotblindheit.

Dahin gehört auch wohl der Versuch von Oppel[1], wonach ein orangegelber Fleck auf blauem Grunde aus der Ferne heller erschien als der Grund, in der Nähe gesehen, wo das Blau mehr auf die Grenze des Gesichtsfeldes fiel, dunkler.

Neben der von Th. Young aufgstellten Farbentheorie sind noch die Theorien der Farbenmischung zu erwähnen, die man direkt aus der Undulationstheorie des Lichts herzuleiten versucht hat, wie dies von Challis und Grailich geschehen ist. Namentlich hat dies der letztere in einer sehr mühsamen Arbeit auszuführen gesucht. Er untersucht die zusammengesetzte Schwingungsbewegung, welche der Äther annimmt, wenn er von zwei Wellenzügen verschiedener Schwingungsdauer erregt wird, und berechnet die Zeiten, während welcher die Ätherteilchen nach einer oder der anderen Seite aus ihrer Gleichgewichtslage entfernt sind. Diese Zeiten sind bei einer solchen zusammengesetzten Bewegung im allgemeinen verschieden groß, während sie bei einer einfachen Farbe gleich groß sind. Grailich nimmt nun an, daß jede Entfernung der Ätherteilchen aus ihrer Gleichgewichtslage nach einer Seite hin denselben Farbeneindruck hervorbringe, wie diejenige einfache Farbe, bei welcher die Entfernung aus der Gleichgewichtslage ebenso lange dauert. So erregt nun nach seiner Annahme die zusammengesetzte Wellenbewegung schnell hintereinander verschiedene Farbeneindrücke im Auge, welche sich zu einer einzigen Empfindung kombinieren, die im allgemeinen einer desto weißlicheren Farbe entspricht, je verschiedenere Empfindungen nacheinander wechseln. Der Eindruck des Weiß selbst soll sich zusammensetzen aus den rasch abwechselnden Eindrücken der mittleren Töne des Spektrums vom Gelblichgrün bis Orange. Da nun bei den zusammengesetzten Wellen auch Perioden vorkommen, welche außerhalb der Grenzen des sichtbaren Spektrums liegen, so nimmt Grailich für diese an, daß sie den Eindruck des Purpur erzeugen.

Die Rechnungen von Grailich sind durchgeführt für diejenigen Intensitätsverhältnisse, welche nach Fraunhofers Messungen die Farben im Flintglasspektrum haben, und stimmen, wenn man die beiden letzten Annahmen von Grailich zugibt, mit meinen Versuchen über Mischung von Spektralfarben, welche ich mit Hilfe des *v*-förmigen Spaltes ausgeführt habe. Aber ich muß bemerken, daß bei diesen Versuchen keineswegs die unveränderte Helligkeit der Spektralfarben bewahrt worden ist, sondern daß ich meist diejenigen Mischfarben zu erzielen gesucht habe, welche gleich weit entfernt von ihren beiden primären Farben sind.

[1] Jahresbericht des Frankfurter Vereins. 1823—1854. S. 44—49.

In denjenigen Fällen nun, wo die Amplituden der beiden Farben verschieden groß sind, läßt sich der Erfolg nicht durch eine allgemeine Theorie vorausbestimmen, sondern nur für einzelne Zahlenbeispiele berechnen, wie es Grailich getan hat. Man erhält dann in jedem einzelnen Beispiele durch die Rechnung eine Reihe verschiedener Farbeneindrücke, die sich einander folgen sollen, und kann daraus nur in ziemlich unbestimmter Weise die Art des Gesamteindrucks abschätzen, wenn man Grailichs Prinzipien folgt. Schlimm für diese Theorie erscheint mir aber der Umstand, daß, wenn man gleiche Amplituden der beiden Wellenzüge annimmt, in welchem Falle sich die mathematische Theorie wirklich durchführen läßt, die Übereinstimmung mit den Erfahrungen sehr mangelhaft wird, was Grailich selbst bemerkt hat. Ist die Wellenlänge des einen Wellenzuges $\lambda_{'}$, die des anderen $\lambda_{''}$, $x$ die Entfernung von irgend einem Punkte eines Strahls längs desselben gemessen, so ist die Entfernung $s$ der Ätherteilchen von der Gleichgewichtslage in irgend einem bestimmten Zeitmomente

$$s = A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_{'}} x + c_{'}\right) + A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_{''}} x + c_{''}\right)$$

$$= 2A \cos\left[\pi x \left(\frac{1}{\lambda_{'}} - \frac{1}{\lambda_{''}}\right) + \frac{c_{'} - c_{''}}{2}\right] \sin\left[\pi x \left(\frac{1}{\lambda_{'}} + \frac{1}{\lambda_{''}}\right) + \frac{c_{'} - c_{''}}{2}\right]$$

oder wenn wir setzen

$$\frac{2}{l_{'}} = \frac{1}{\lambda_{'}} - \frac{1}{\lambda_{''}} \qquad 2\gamma_{'} = c_{'} - c_{''}$$

$$\frac{2}{l_{''}} = \frac{1}{\lambda_{'}} + \frac{1}{\lambda_{''}} \qquad 2\gamma_{''} = c_{'} + c_{''}$$

so erhalten wir

$$s = 2A \cos\left(\frac{2\pi x}{l_{'}} + \gamma_{'}\right) \sin\left(\frac{2\pi x}{l_{''}} + \gamma_{''}\right).$$

Die Entfernungen der Punkte, wo $s = 0$, sind nun in diesem Falle leicht zu bestimmmen. Nämlich die Nullpunkte des Faktors $\sin\left(\frac{2\pi x}{l_{''}} + \gamma_{''}\right)$ liegen um die Länge $\frac{1}{2} l_{''}$ voneinander entfernt, die des Faktors $\cos\left(\frac{2\pi x}{l_{''}} + \gamma_{'}\right)$ um die viel größere Länge $l_{''}$ und können sich zwischen jene ersteren einschieben, oder mit ihnen zusammenfallen. Im letzteren Falle namentlich würde man nach Grailichs Prinzipien lauter gleiche Wellenlängen in der zusammengesetzten Bewegung haben, die alle denselben Farbeneindruck hervorbrächten, und auch wenn die Nullpunkte beider Faktoren nicht zusammenfielen, könnten die selteneren des Cosinus den Eindruck, den die häufigeren Wellen des Sinusgliedes machen, nicht wesentlich stören. Daraus folgt aber nach Grailichs eigener Rechnung, daß Violett und Rot Grün geben müßten, während sie in Wirklichkeit Purpurrot geben, und überhaupt stimmen die Resultate bei kleinen Differenzen der Wellenlängen mit der Erfahrung, während sie bei großen Differenzen beträchtlich abweichen, da der Wert von $l_{''}$ immer nur zwischen $\lambda_{'}$ und $\lambda_{''}$ liegen kann, und einem der mittleren Töne des Spektrums entspreehen muß. Ich glaube deshalb, daß die Annahmen der Grailichschen Theorie noch beträchtlich zu

modifizieren sein werden, ehe sie der Erfahrung genügend entsprechen kann, wenn man überhaupt auf diesem Wege eine Erklärung suchen will.

Die einfachste unter den Methoden, um prismatische einfache Farben zu mischen, und gleichzeitig alle Kombinationen aus je zwei solchen zu erhalten, ist die, daß man in einem dunklen Schirme einen $v$-förmigen Spalt anbringt, dessen beide Schenkel wie $ab$ und $bc$ in Fig. 24 $A$ unter $45^0$ gegen den Horizont geneigt sind, und diesen Spalt, der vor einen hellen Hintergrund gestellt ist, durch ein Prisma mit senkrecht stehender brechender Kante betrachtet. Die Spektra haben dann die Form wie in

Fig. 24. Fig. 25.

Fig. 25, wo $\alpha\beta\beta_,\alpha_,$ das Spektrum des Schenkels $ab$ und $\gamma\beta\beta_,\gamma_,$ das Spektrum von $bc$ ist. In dem ersteren laufen die Farbenstreifen parallel $ab$ und $\alpha\beta$, im zweiten parallel $bc$ und $\beta\gamma$, wie die gestrichelten Linien. In dem mittleren dreieckigen Felde $\beta\delta\beta_,$, welches beiden Spektren gemeinsam ist, schneiden alle Farbenstreifen des einen Spektrums alle Farbenstreifen des andern, und es entstehen dadurch an diesen Stellen alle aus je zwei einfachen Farben gebildeten Mischfarben. Wenn die Breite der Spalten unveränderlich ist, so kann doch das Verhältnis der Quantitäten des gemischten Lichts dadurch geändert werden, daß man das Prisma aus der senkrechten Stellung in eine geneigte bringt, wodurch die Spektra die Form wie Fig. 26 annehmen und das eine $\beta\gamma\beta_,\gamma_,$ in welchem dieselbe Lichtmenge auf einen kleineren Raum verteilt wird, heller wird, während das andere $\alpha\beta\beta_,\alpha_,$ dessen Flächenraum vergrößert ist, an Helligkeit verliert.

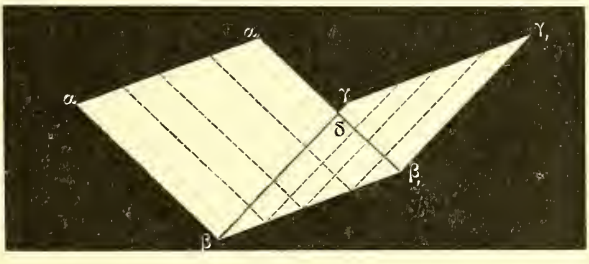



Fig. 26.

Man kann durch diese Methode die meisten der oben angeführten Resultate gewinnen. Eine genaue Beurteilung der Mischfarben, namentlich der weißlicheren, ist aber erstens dadurch erschwert, daß die einzelnen Farben einen zu kleinen Raum einnehmen, selbst wenn man die Beobachtung mit einem Fernrohr ausführt, zweitens dadurch, daß man im Gesichtsfelde eine Menge anderer glänzender Farben daneben hat, welche durch Kontrastwirkungen das Ansehen der minder gesättigten Farben stark verändern.

Diese Übelstände sind bei einer zweiten Methode vermieden; für diese wird ein komplizierterer Apparat gebraucht, von dem Fig. 27 eine horizontale Projektion darstellt. Man läßt Sonnenlicht, welches von einem Heliostaten reflektiert ist, durch einen vertikalen Spalt in ein dunkles Zimmer fallen, läßt es durch ein Prisma $P$ Fig. 27 und eine achromatische Linse $L_,$ gehen, in deren Brennpunkt ein Schirm $S_,$ steht, auf dessen vorderer Fläche ein objektives Spektrum entworfen wird. Zwischen Linse und Schirm befindet sich ein Diaphragma $D$ mit rechteckigem Ausschnitt. Der Schirm $S_,$ hat zwei vertikale Spalten bei $\gamma_,$ und $\gamma_{,,}$, welche von dem Lichte,

das hier zu dem Spektrum vereinigt ist, zwei Farbenstreifen durchgehen lassen, während alles andere farbige Licht von dem Schirme zurückgehalten wird. Hinter diesem Schirme ist eine zweite achromatische Linse $L_{,,}$ von kürzerer Brennweite angebracht, welche auf dem zweiten Schirme $S_{,,}$ ein Bild $\delta_{,}\delta_{,,}$ des Diaphragma $D$ ent-

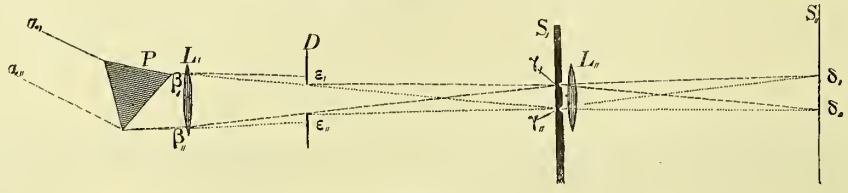



Fig. 27.

wirft. Die Breite des einfallenden weißen Strahlenbündels ist $\alpha_{,}\alpha_{,,}$; hinter der Linse $L_{,}$ sind die Grenzstrahlen der beiden verschiedenfarbigen Strahlenbündel, deren Brennpunkte mit den beiden Spalten $\gamma_{,}$ und $\gamma_{,,}$ zusammenfallen, dadurch unterschieden, daß die brechbareren gestrichelt, die weniger brechbaren punktiert sind. Die Öffnung des Diaphragma $D$ muß so eng gemacht werden, daß sie ganz von Strahlen beider Bündel ausgefüllt ist, so daß von jedem Punkte der Öffnung Strahlen der betreffenden Farbe auf jeden Punkt der Spalten $\gamma_{,}$ und $\gamma_{,,}$ fallen. Macht man die vordere Seite des Diaphragmas weiß, so sieht man darauf das Strahlenbündel als weißen Fleck mit farbigen Rändern sich projizieren (bei $\varepsilon_{,}$ blau, bei $\varepsilon_{,,}$ rot). Um die genannte Bedingung zu erfüllen, muß die Öffnung ganz in der weißen Mitte der beleuchteten Stelle liegen. Unter diesen Umständen ist die Öffnung des Diaphragmas gleichsam das leuchtende Objekt, von welchem zweierlei Licht durch die Spalten des Schirms $S_{,}$ auf die Linse $L_{,,}$ fällt. In dem Bilde $\delta_{,}\delta_{,,}$, welches die Linse von dem Diaphragma $D$ entwirft, ist beiderlei Art Licht über dieselbe gleichmäßig ausgebreitet, und diese Fläche erscheint daher in der Mischfarbe, oder wenn man eine der Spalten verdeckt, in einer der einfachen Farben.

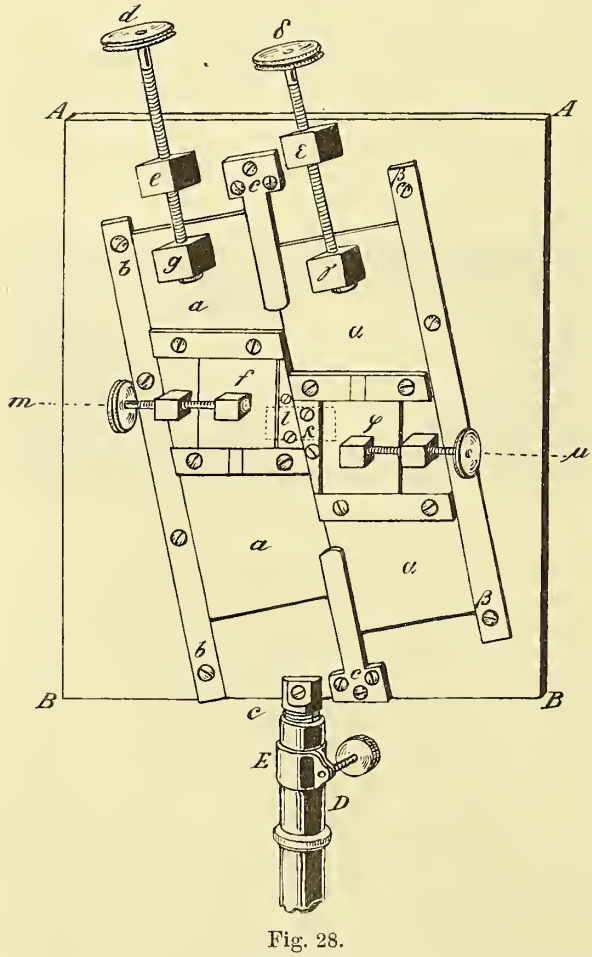



Fig. 28.

Um den Farbenton und die Intensität der gemischten Lichter nach Belieben und sehr allmählich ändern zu können, ist eine besondere Konstruktion des Schirms $S_{,}$ nötig, und ist derselbe in Fig. 28 abgebildet. Der Schirm besteht aus der viereckigen Messingplatte $AABB$, die bei $C$

durch einen zylindrischen Stab getragen wird. Letzterer verschiebt sich in einer gespaltenen zylindrischen Hülse $D$, die in der Mitte eines mit drei Stellschrauben versehenen Brettes befestigt ist. Der Schirm kann also mit seinem Träger $C$ auf und nieder geschoben, und in jeder Höhe mittels des gespaltenen und durch eine Schraube zusammengezogenen Ringes $E$ festgestellt werden.

Auf der Messingplatte $AABB$ sind in schräger Richtung zwei Schlitten beweglich, deren Grundlagen die Messingplatten $aa$ und $\alpha\alpha$ sind. Mit $bb$, $\beta\beta$, $c$ und $c$ sind die Schienen bezeichnet, zwischen denen sich die Platten verschieben. Diese Platten werden durch die Schrauben $d$ und $\delta$ bewegt, deren Mütter in die an der großen Platte $AABB$ befestigten Messingklötze $e$ und $\varepsilon$ eingeschnitten sind, und deren Enden drehbar in den Klötzen $g$ und $\gamma$ befestigt sind, welche von den beweglichen Platten getragen werden. Durch Drehung der Schrauben $d$ und $\delta$ verschiebt man also die Platten $aa$ und $\alpha\alpha$ parallel den Schienen, zwischen denen sie als Schlitten gehen.

Auf der beweglichen Platte $aa$ ist nun wieder als Schlitten beweglich die Platte $f$ zwischen horizontalen Schienen angebracht, und durch die Schraube $m$ zu verstellen. Ebenso auf der Platte $\alpha\alpha$ die Platte $\varphi$ mit der Stellschraube $\mu$. Zwischen den einander zugekehrten Rändern der Platte $f$ und $\varphi$ liegen noch die beiden dreieckigen ebenso dicken Platten $l$ und $\lambda$, jene auf $aa$, letztere auf $\alpha\alpha$ befestigt. Die einander zugekehrten und zugeschärften Ränder von $f$ und $l$, sowie von $\varphi$ und $\lambda$ bilden zwei Paare Gravesandescher Schneiden.

Dahinter befindet sich in der großen Platte $AABB$ ein entsprechender Ausschnitt, um das Licht, welches durch die beiden Spalten gegangen ist, weiter hindurchzulassen. Die vorderen Flächen von $f$, $l$, $\varphi$ und $\lambda$ sind matt versilbert, um das Spektrum darauf gut projizieren zu können. Der Ort des Spektrums ist durch das kleine punktierte Rechteck angedeutet.

Verschiebt man mittels der Schrauben $d$ und $\delta$ die Platten $aa$ und $\alpha\alpha$, so treten die Spalten unter einen anderen Ort des Spektrums, und es gehen andere Farbentöne durch sie hindurch. Durch die Schrauben $m$ und $\mu$ dagegen ändert man die Breite der Spalten und damit auch die Menge des durchgelassenen Lichts.

Es kommt darauf an, daß der Vereinigungspunkt gleichfarbiger Strahlen, welche durch die Linse $L_{'}$ gegangen sind, genau auf der Ebene des Schirms $S_{'}$ liegt, sonst zeigt das Farbenfeld auf $S_{''}$ von rechts nach links verschiedene Farbentöne. Die Spalten müssen den dunklen Linien des Spektrums parallel sein, was durch die Stellschrauben am Fuße des Schirms $S_1$ bewirkt werden kann. Auch müssen alle Unreinigkeiten an der Linse und Prisma, welche gefärbte Flecke in dem Farbenfelde geben würden, sorgfältig entfernt werden. Zwischen den beiden einzelnen Linsen der achromatischen Doppellinse $L_{'}$ bilden sich leicht Newtonsche Ringe, die im Farbenfelde abgebildet werden. Diese entfernt man, indem man Kanadabalsam zwischen die Linsen bringt. Je weiter man übrigens das Diaphragma $D$ von der Linse $L_{'}$ entfernt, desto verwaschener ist das Bild solcher Flecken in den Gläsern, und desto weniger stören sie. Es ist deshalb die hier abgebildete Anordnung des Apparats besser, als die früher von mir beschriebene.

Bei dieser Methode hat das farbige Feld eine größere Ausdehnung als bei der ersten, und alle anderen Farben, welche durch Kontrastwirkungen stören könnten, sind entfernt. Doch bleiben noch in vielen Fällen manche Hindernisse bestehen, die eine ruhige und sichere Beurteilung der Mischfarbe erschweren. Es macht sich erstens die Farbenzerstreuung im Auge bei Zusammensetzungen nur zweier einfacher Farben von sehr verschiedener Brechbarkeit viel bemerkbarer als bei weißem Lichte (s. oben Bd. I, S. 149). Der Rand des Farbenfeldes färbt sich deshalb leicht mit einer von beiden Farben, während in der Mitte die andere überwiegt. Dann ist das Auge bei einigen weißen Mischfarben, namentlich bei dem aus Rot und Grünblau zusammengesetzten Weiß, außerordentlich empfindlich gegen die kleinsten Einmischungen einer der ursprünglichen Farben, so daß die kleinsten Unregelmäßigkeiten des Apparats und

etwa vorhandene Nachbilder im Auge, namentlich bei größerer Lichtstärke, sehr stören. Endlich sind hierbei auch die Verschiedenheiten des Eindrucks zwischen Mitte und Randteilen der Netzhaut sehr auffallend. Verhältnismäßig am leichtesten ist es, Weiß aus Gelb und Indigo zusammenzusetzen, schwerer aus Gelbgrün und Violett oder Goldgelb und Wasserblau, am schwersten aus Rot und Grünblau.

Die Wellenlängen der komplementären einfachen Farben habe ich in der Weise bestimmt, daß ich die Linse $L_{''}$ und den Schirm $S_{''}$ entfernte und aus einiger Entfernung die Spalte des Schirms $S_{'}$ durch ein Fernrohr betrachtete, vor dessen Objektiv eine Glasplatte mit feinen äquidistanten vertikalen Linien angebracht war. Man sieht dann Diffraktionsspektra der Spalten, deren scheinbare Entfernung von dem betreffenden Spalte der Wellenlänge proportional ist. Man braucht also nur in derselben Weise die Entfernung der Diffraktionsspektra für eine der dunklen Linien des Spektrums zu messen, deren Wellenlänge Fraunhofer bestimmt hat, so ergeben sich daraus leicht die Wellenlängen der beobachteten gemischten Farben.

Um das farbige Licht der Pigmente und anderer Naturkörper zu mischen, ist das einfachste Verfahren folgendes. In einiger Entfernung (1 Fuß) über einer schwarzen Tischplatte bringt man eine kleine vertikal gestellte Glasplatte *a* mit ebenen und parallelen Flächen an, deren Ebene verlängert die Tischplatte in *d* schneiden möge. Indem das Auge des Beobachters schräg abwärts nach der Glasplatte *a* hinsieht, sieht er mittels des von der Platte durchgelassenen Lichtes den Teil *db* des Tisches, mittels des reflektierten Lichts dagegen den Teil *dc* scheinbar mit *db* zusammenfallend. Legt man in gleicher Entfernung von *d* in *c* und in *b* gefärbte Oblaten oder andere gefärbte Flächen hin, so erblickt der Beobachter das Spiegelbild von *c* mit *b* zusammenfallend. Das farbige Licht von *c* schlägt an der Vorderfläche der Glasplatte *a* genau denselben Weg ein, auf welchem das farbige Licht von *b* fortgeht, und beide Lichter fallen also gemischt in das Auge *o*, das von ihm gesehene gemeinsame Bild von *b* und *c* muß also in der Mischfarbe erscheinen. Das Intensitätsverhältnis reguliert man durch Verschiebung der beiden Oblaten. Je näher sie an *d* liegen, desto stärker ist das reflektierte Licht von *c*, desto schwächer das durchgelassene von *b*.

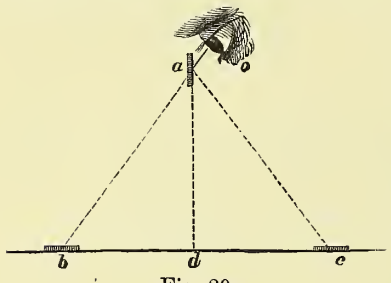


Fig. 29.

Man kann auf diese Weise auch Licht, welches durch farbige Gläser oder Flüssigkeiten gegangen ist, zur Mischung anwenden. Dazu macht man in der Platte *b c* Öffnungen, durch welche das Licht gelangt. So kann man auch das durch einen Spiegel reflektierte Licht des blauen Himmels mit dem von Chromgelb mischen, und sich überzeugen, daß beide, wie Ultramarin und Chromgelb, ein rötliches Weiß geben, daß das Himmelblau also weißliches Indigblau ist, nicht aber dem weniger brechbaren Blau des Spektrums entspricht, welches wir Cyanblau genannt haben.

Die zuletzt beschriebene Methode hat vor den Mischungen auf dem Farbenkreisel den Vorzug, daß die weißlichen Mischungen nicht grau, sondern weiß erscheinen. Die Einrichtung der Farbenkreisel wird in § 22 näher beschrieben werden. Als weitere Methoden, farbiges Licht zusammenzusetzen, ist noch zu erwähnen ein Versuch von Volkmann, der durch gefärbte Gewebe, die er dicht vor das Auge hielt, nach farbigen Flächen hinsah. Die Mischung beider Farben wird aber schwer recht gleichmäßig, und es kann auch die Durchsichtigkeit der Fäden stören, indem die Fäden teilweise wie ein farbiges Glas wirken, durch welches man eine farbige Fläche sieht. Czermak hat den Scheinerschen Versuch benutzt, indem er durch einen Schirm mit zwei engen Öffnungen sah, welche mit verschiedenfarbigen Gläsern bedeckt waren. So weit die Objekte einfach erscheinen, erscheinen sie auch in der Mischfarbe. Holtzmann läßt das diffus reflektierte Licht zweier farbigen Papiere

auf weißes Papier fallen. Challis erwähnt Versuche, wie sie übrigens schon Mile angestellt hatte, bei denen Papiere, die mit Streifen verschiedener Farben versehen waren, aus solcher Entfernung betrachtet wurden, daß die Streifen einzeln nicht mehr erkannt werden konnten. Endlich hat Dove Methoden beschrieben, um Interferenz- und Absorptionsfarben zu mischen. Er benutzt dazu Spiegel, die aus farbigen Gläsern mit Silber belegt gebildet sind. Die vordere Fläche solcher Spiegel gibt polarisiertes weißes Licht, die hintere unpolarisiertes durch Absorption gefärbtes. Geht nun das so gemischte Licht durch eine Glimmerplatte und ein Nicolsches Prisma, so bleibt das letztere Licht unverändert. Das polarisierte weiße Licht dagegen wird durch die Interferenz des ordentlichen und außerordentlichen Strahls im Krystall so gefärbt, daß seine Farbe einer der Farbenstufen von Newtons Ringsystemen entspricht. Beide Arten von Licht fallen vermischt in das Auge des Beobachters.

Die Lehre von der Farbenmischung ging von den Erfahrungen der Maler über Mischung der Pigmente aus. Schon Plinius erwähnt, daß die älteren griechischen Maler mit vier Farbstoffen alles darzustellen gewußt hätten, während man zu seiner Zeit deren viel mehr besäße, und doch nicht so viel, wie jene, leistete. Und doch ist auch in dem berühmten Gemälde der Aldobrandinischen Hochzeit aus der Römerzeit der Aufwand von Farbstoffen sehr klein, wie Davys chemische Untersuchungen zeigten[1]. Leonardo da Vinci nennt außer Schwarz und Weiß, welche jedoch nicht im eigentlichen Sinne Farben wären, vier einfache Farben, nämlich Gelb, Grün, Blau und Rot; sonst fordert er noch an einer anderen Stelle für die Malerei Orange (*lionato*) und Violett (*morello, cioè pavonazzo*). Daß Leonardo das Grün stets als einfache Farbe zählt, obgleich er weiß, daß es gemischt werden kann, widerspricht eigentlich seiner Definition der einfachen Farben als solcher, die nicht gemischt werden können. Sollte er bemerkt haben, daß das ungemischte Grün viel lebhafter ist als das gemischte? Die nachher gewöhnlich angenommenen drei Grundfarben Rot, Gelb und Blau findet man schon vor Newtons Untersuchungen, als eine damals allgemein anerkannte wissenschaftliche Tatsache erwähnt in einem Versuch zur Klassifikation der Farben und Farbstoffe von Waller. Darin, daß man drei Grundfarben ausreichend findet, liegt schon die Anerkennung der Tatsache, daß die Beschaffenheit des farbigen Lichts eine Funktion nur dreier Variablen ist; auf die Wahl der Grundfarben, welche erst viel später Wünsch und Thomas Young zu ändern suchten, haben die Erfahrungen über gemischte Pigmente den entschiedensten Einfluß. Man meint aus Gelb und Blau Grün zusammensetzen zu können. Das ist richtig, wenn man es auf die Pigmente bezieht, aber nicht für farbiges Licht.

Newton setzte zuerst farbiges Licht zusammen, und zwar das des primatischen Spektrums, benutzte aber daneben für Aufstellung der Regel der Farbenmischung die Mischung farbiger Pulver, und legte auf die Abweichungen zwischen beiden, die ihm nicht ganz entgangen zu sein scheinen, kein großes Gewicht, da ihm die experimentellen Hilfsmittel noch fehlten, die Sache genauer zu verfolgen. Er erwähnt, daß aus *subflavum* und *cyaneum* (d. h. grünlich Gelb und Cyanblau) nur ein weißliches Grün zu erzeugen sei. Newton stellte auch zuerst einen genaueren Ausdruck des Gesetzes der Farbenmischung hin, indem er es auf die oben besprochene graphische Darstellung und Schwerpunktskonstruktionen zurückführte. Sein Gesetz entsprach den vorliegenden experimentellen Erfahrungen, eine genauere Prüfung hat er nicht versucht. Seine Darstellung des Systems der Farben auf einem Kreise war eine Erweiterung des Systems dreier objektiver Grundfarben; über das Ungenügende des letzteren Systems spricht er sich aber nirgends aus.

Dagegen kehrten die späteren Physiker bei ihren Versuchen, das System der Farben zu ordnen, meist zum System der drei Grundfarben zurück, so le Blond 1735, du Fay 1737, Tobias Mayer 1758, J. H. Lambert 1772, D. R. Hay, J. D. Forbes. Ihre Farbensysteme sind praktisch ausgeführt meist in der Weise,

[1] Gilberts Annalen LII. 1.

daß sie bestimmte Pigmente, nach bestimmten Gewichtsverhältnissen mischten. Mayer brauchte Zinnober, Königsgelb (Chromsaures Bleioxyd) und Bergblau (Kobaltglas), Lambert Carmin, Gummigutt, Berlinerblau (Eisencyanürcyanid). Letzterer bestimmte auch die Sättigungsverhältnisse dieser Farbstoffe, indem er die Gewichtsmengen bestimmte, in denen je zwei gemischt werden müssen, um eine Mischfarbe hervorzubringen, welche gleichweit von den Farben ihrer beiden Bestandteile entfernt sei. Er mußte nehmen von Carmin 1 Teil, von Berlinerblau 3 Teile, von Gummigutt 10 Teile. Letztere Gewichte wählte er dann als Maßeinheiten bei Anfertigung der Mischungen. Übrigens fallen die Mischungen so weit voneinander entfernter Farbstoffe immer ziemlich unansehnlich und grau aus.

Neuere Beobachtungen, welche unter Umständen, wo Mischung farbigen Lichts zu erwarten war, von der bisherigen Regel abweichende Resultate lieferten, machten 1829 Plateau am Farbenkreisel, Volkmann 1838 an Zerstreuungsbildern, ohne aber dadurch zu einer näheren Untersuchung des Widerspruchs geführt zu werden. Ich selbst wurde durch Versuche über Mischung der Spektralfarben zu der Erkenntnis geführt, daß Mischung des Lichts und Mischung von Pigmenten verschiedene Resultate gebe, und erörterte die Gründe davon. Ich hatte hierbei die Mischung der Spektralfarben mittels des V-förmigen Spaltes benutzt und nur aus Gelb und Indigblau Weiß erhalten, nicht aus irgendwelchen anderen Paaren von Spektralfarben. Dies widersprach dem Mischungsgesetz von Newton und veranlaßte Grassmann zu einer ausführlichen Erörterung der Prinzipien von Newtons Mischungsgesetz. Die Untersuchung der gemischten Spektralfarben nach einer besseren Methode, welche ich ausführte, hob die scheinbaren Widersprüche gegen Newtons Regel auf, so weit sie sich auf die Anwendbarkeit der Schwerpunktskonstruktionen beziehen; dagegen mußte ich freilich die Kreisform des Farbenfeldes Grassmann gegenüber als unerwiesen stehen lassen. Endlich sind nun die Prinzipien von Newtons Mischungsgesetz experimentell geprüft worden 1857 durch Maxwell.

Th. Youngs Theorie der Farbenempfindungen ist wie so vieles, was dieser bewundernswürdige Forscher seiner Zeit voraneilend geleistet hatte, unbeachtet liegen geblieben, bis ich selbst und Maxwell wieder auf sie aufmerksam machten. Man begnügte sich mit der Annahme, daß der Sehnerv verschiedenartiger Empfindungen fähig sei, ohne weiter nach dem Grunde zu suchen, warum das System dieser Empfindungen eben ein solches sei, wie es das Auge darbietet.

---

1519. Leonardo da Vinci, *Trattato della pittura.* Paris 1651.
1686. R. Waller, *A catalogue of simple and mixte colours. Phil. Trans.* 1686.
1704. *Newton, *Optice.* Lib. 1. P. II. Prop. IV—VI.
1735. le Blond. *Il Colorito.* London.
1737. du Fay, *Mém. de l'Acad. roy. de Paris* 1737.
1758. T. Mayer in Göttinger gelehrte Anz. 1758. St. 147.
1772. J. H. Lambert, Beschreibung einer Farbenpyramide. Berlin.
1792. Wünsch, Versuche und Beobachtungen über die Farben des Lichts. Gilberts Ann. XXXIV. 10.
1807. Th. Young, *Lectures on natural philosophy.* London.
1829. Plateau, *Dissert. sur quelques propriétés des impressions produites par la lumière sur l'organe de la vue.* Lüttich.
1836. Challis in Poggendorffs Ann. XXXVII. 528.
1838. Volkmann in J. Müllers Archiv für Anat. und Physiol. 1838. S. 373.
1839. Mile ebenda 1839. S. 64.
D. R. Hay, *Nomenclature of colours.*
1843. J. Müller, Zusammensetzung des weißen Lichts aus den verschiedenen Farben. Poggendorffs Ann. LVIII. 358. 518.

1847. Dove, Über die Methoden aus Komplementärfarben Weiß darzustellen, und über die Erscheinungen, welche polarisiertes Licht zeigt, dessen Polarisationsebene gedreht wird. Berliner Monatsber. 1846. S. 70; Poggendorffs Ann. LXXI. 97; *Phil. Mag.* XXX. 465; *Inst.* Nr. 712. p. 176; *Arch. d. sc. ph. et nat.* V. 276.
Chevreul, *Exposé d'un moyen de définir et nommer les couleurs d'après une méthode rationelle et expérimentale. Quesneville revue scient.* XXIX. 382. *C. R.* XXXII. 693. *Inst.* Nr. 906. p. 155. Dingl. polyt. J. CXXI. 367. Athen 1851. p. 272.

1848. Brücke, Über das Wesen der braunen Farbe. Poggendorffs Ann. LXXIV. 461. *Phil. Mag.* XXXIII. 281. *Inst.* Nr. 785. p. 21.
Harless, Physiologische Beobachtung und Experiment. Nürnberg 1848. S. 45. (Eine Farbe durch die andere gesehen.)
Chr. Doppler. Versuch einer systematischen Klassifikation der Farben. Prag 1848, aus Abhandl. der böhm. Ges. V. 401.

1849. J. D. Forbes, *Hints towards a classification of colours. Philos. Magaz.* XXXIV. 161.

1852. *H. Helmholtz, Über die Theorie der zusammengesetzten Farben. Müller. Archiv für Anat. und Physiol. 1852. S. 461—482. Poggendorffs Ann. LXXXVII. 45—66; *Phil. Mag.* (4) IV. 519—534; *Cosmos.* II. 112—120. *Ann. de chim.* (3) XXXVI. 500—508; Fechner, Zentralblatt 1853. p. 3—9.

1853. L. Foucault, *Sur la récomposition des couleurs du spectre en teintes plates. Cosmos.* II. 232; Poggendorffs Ann. LXXXVIII. 385—387.
*H. Grassmann, Zur Theorie der Farbenmischung. Poggendorffs Ann. LXXXIX. 69—84. *Phil. Mag.* (4) VII. 254—264.

1853. Holtzmann, Apparat zur Darstellung von Farbenmischungen. Tagblatt der deutschen Naturforscherversammlung 1853.
J. Plateau, Reklamation. Poggendorffs Ann. LXXXVIII. 172—173. *Cosmos.* II. 241.
Fechner, Zentralblatt. 1853. p. 365.
H. Helmholtz, *On the mixture of homogeneous colours.* Athen. 1853. p. 1197 bis 1198; *Cosmos.* III. 573—575; *Rep. of Brit. Assoc.* 1853. 2. p. 5. Poggendorffs Ann. XCIV. 1—28. *Ann. de chim.* (3) XLIV. 70—74. *Arch. d. sc. phys.* XXIX. 242.

1854. J. Grailich, Beitrag zur Theorie der gemischten Farben. Wiener Ber. XII 783—847. XIII. 201—284.
J. Czermak, Physiologische Studien. Wien. Ber. XII. 322. § 6 und XVII. 565.

1855. *J. C. Maxwell, *Experiments on colour, perceived by the eye, with remarks on colour blindness. Edinb. Trans.* XXI. 275—297. *Edinb. Journ.* (2) I. 359—360. *Proc. of Edinb. Soc.* III. 299—301. *Phil. Mag.* (4) XIV. 40.
G. Wilson, *Observations on Mr.* Maxwells *paper. Edinb. J.* (2) I. 361.
J. D. Forbes, *Observations on Mr.* Maxwells *paper. Edinb. J.* (2) I. 362.

1856. J. G. Maxwell, *On the theory of compound colours with reference to mixtures of blue and yellow light.* Athen. 1856. p. 1093. *Edinb. J.* (2) IV. 335—337. *Inst.* 1856. p. 444. *Rep. of British Assoc.* 1856. 2. p. 12—13.
Challis, *On theory of the composition of colours on the hypothesis of undulations. Phil. Mag.* (4) XII. 329—338 und 521.
G. G. Stokes, *Remarks on* Challis's *paper. Phil. Mag.* (4) XII. 421.

1857. Dove, Eine Methode Interferenz- und Absorptionsfarben zu mischen. Berl. Monatsber. 11. März 1857. Poggendorffs Ann. CII.

## Farbenblindheit.

Huddart, *Phil. Trans.* LXVII. I. 14.
Collardo, *Journ. de Physique.* XII. 86.
Whisson, *Phil. Trans.* LXVIII. II. 611. *Journ. de Phys.* XII.
Giros v. Gentilly, Theorie der Farben (unter dem Pseudonym G. Palmer engl. und französ. erschienen. Lichtenberg Magaz. I. 2. 57.
Harvey, *Edinb. Phil. Trans.* X. 253. *Edinb. J. of Sc.* VII. 85.
J. Butters, *Edinb. Phil. Journ.* XI. 135. Archiv für Physiol. v. Meckel. V. 260.
Nicholl, *Medico chir. Trans.* VII. 477. IX. 359. *Ann. of Phil.* N. S. III. 128.
v. Goethe, Zur Naturwiss. und Morphologie. 1. Heft. 297. Zur Farbenlehre. 1. § 103.
Meckel, Archiv für Physiol. I. 188. *Ann. of philos.* 1822. Febr. p. 128.
Wardrop, *Essays on the morbid anatomy of the human eye.* London 1818. II. 196. Meckel, Archiv für Physiol. V.

1857. Brewster, *Edinb. Journ. of Sc.* VII. 86. XIX. 153. *Edinb. phil. J.* VI. Poggendorffs Ann. XXIII. 441.
J. Herschel, Artikel *Light* in *Encyclop metrop.* p. 434. § 507.
Colqhoun aus *Glasgow Med. Journ.* in Frorieps Notizen. XXIV. 305.
J. Dalton, *Memoirs of Lit. and Phil. Soc. of Manchester.* V. *Edinb. Journ. of Sc.* IX. 97.
Sommer in Graefe und Walther Journal für Chirurgie. V.
Salzburger mediz. chirurg. Zeitung. IV.
Gall, *Anat. et Physiologie du système nerveux.* IV. 98.
Rozier, *Observ. sur la physique.* XIII.
Brewster, Briefe über natürl. Magie. Übers. S. 44.
Helling, Prakt. Handbuch der Augenkrankheiten. I. S. 1.
1837. *A. Seebeck, Über den bei manchen Personen vorkommenden Mangel an Farbensinn. Poggendorffs Ann. XLII. 177—233.
1849. Wartmann, *Bull. de Brux.* XVI. I. 137. *Inst.* XVII. Nr. 799. p. 131.
d'Hombre Firmas. *C. R.* XXIX. 175. XXX. 60, 376. *Inst.* Nr. 815. p. 259.
1852. Schnetzler, *Arch. d. sciences phys.* XXI. 251—252.
Burckhardt, Verh. der naturf. Gesellsch. in Basel. X. 90—93.
1854. Wilson, *Proc. of Edinb. Soc.* III. 226—227.
Eichmann in Fechner Zentralblatt 1854. p. 294—295. Med. Z. S. des Ver. f. Heilkunde in Preußen 1853. 224.
1853—55. G. Wilson in *Monthly J. of med. science.* Nov. 1853 bis Dez. 1854. *Edinb. Journ.* (2) IV. 322—327.
Derselbe, *Researches on Colour-Blindness.* Edinb. 1855. Darin auch Maxwell, *On the Theory of Colours in relation to Colour-Blindness.* p. 153.
1856. W. Pole, *Proc. of Roy. Soc.* VIII. 172—177. *Phil. Mag.* (4) XIII. 282—286. J. Tyndall, *Phil. Mag.* (4) XI. 329—333. Silliman J. (2) XXII. 143—146. *Arch. d. sc. phys.* XXXIII. 221—225.

---

*Nachtrag von Helmholtz aus der ersten Auflage.*

Cl. Maxwell hatte eine wichtige Reihe von Versuchen über Mischung der Spektralfarben angestellt, um die Farbentöne der drei Grundfarben und die Form der drei Intensitätskurven Fig. 21 S. 120 zu bestimmen, welche nach Th. Youngs Theorie die Stärke der einzelnen Grundfarben für jede Stelle des Spektrums ausdrücken. Er ließ zu dem Ende weißes Licht durch drei Spalten, deren Weite und Stellung geändert werden konnte, in einen dunklen Kasten treten. Das Licht ging dann durch zwei Prismen und wurde durch eine Linse auf einen Schirm vereinigt, wo es demnach drei teilweise sich deckende prismatische Spektra bildete. Ein Spalt in diesem Schirm ließ eine der Mischfarben austreten, um in das Auge des Beobachters zu fallen. Der letztere, durch den Spalt blickend, sah vor sich die Fläche der Linse gleichmäßig bedeckt mit der betreffenden Mischfarbe. Durch eine andere Abteilung des Kastens fiel von demselben weißen Lichte ein, ohne durch ein Prisma zu gehen. Durch einen passend angebrachten Spiegel von schwarzem Glase wurde dieses Weiß dem Beobachter ebenfalls zugelenkt, und dieser erblickte es als ein weißes Feld dicht neben der Linse. Seine Aufgabe bestand darin, die Stellung und Weite der drei Spalten, welche das prismatisch zerlegte Licht lieferten, so lange zu ändern, bis die Mischfarbe der drei prismatischen Farben dem unverändert gespiegelten Weiß genau gleich aussah.

Eine bequemere Form gab Maxwell dem Instrumente später dadurch, daß er das durch die Prismen gegangene Licht von einem Konkavspiegel wieder

durch die Prismen zurückwerfen ließ. Dadurch wird das Ganze kürzer und der Beobachter kommt dicht neben die Schlitze zu sitzen, so daß er diese selbst einstellen kann, was ein großer Vorteil ist.

Maxwell brauchte als Grundfarben 1. ein Rot zwischen den Fraunhoferschen Linien *C* und *D*, von letzterer doppelt so weit entfernt, als von ersterer. Es wäre dies nach unseren oben festgesetzten Farbenbezeichnungen Scharlachrot übergehend nach Orange. 2. ein Grün nahe der Linie *E*. 3. ein Blau zwischen *F* und *G*, von letzterem doppelt so weit entfernt, als von ersterem; etwa auf dem Übergang von Cyanblau zu Indigblau.

Aus diesen dreien wurde während einer Beobachtungsreihe von Zeit zu Zeit immer wieder Weiß zusammengesetzt und die Breite der Spalten, die dazu nötig war, notiert, um dadurch die unveränderte Mischung des normalen weißen Lichts zu konstatieren. Durch die Breite der Spalten wurde die Quantität des hierbei nötigen Lichts gemessen. Dazwischen wurde dann aus je zweien der Grundfarben und einer beliebig gewählten dritten Farbe Weiß zusammengesetzt und der Ort der dritten Farbe im Spektrum nach einer neben den drei Spalten angebrachten Skala, sowie die Breite der Spalten notiert.

War das Weiß hinreichend unverändert geblieben, so erhielt man auf diese Weise eine Reihe von Farbengleichungen, aus denen der Ort der beobachteten Spektralfarben in einer Farbentafel bestimmt werden konnte, nachdem der Ort der gewählten drei Grundfarben in derselben willkürlich festgesetzt war. Auf diese Weise erhält man nach wirklichen Beobachtungen die Form der Kurve der Fig. 22 S. 121, welche ich dort nach bloßer Schätzung entworfen habe. Die von Maxwell so entworfenen Kurven für zwei Beobachter schließen sich der Umfanglinie des Dreiecks *ARV* sehr viel näher an, als es in Fig. 22 der Fall ist, so daß die Kurve zwei fast geradlinige Teile erhält. Ihre am meisten hervorspringenden Biegungen, die also den Ecken des vollständigen Farbendreiecks am nächsten zu kommen scheinen, entsprechen etwa den drei oben genannten Grundfarben. Doch müßte nach den Beobachtungen des ersten Beobachters das Blau, nach denen des zweiten das Rot etwas mehr gegen das Ende des Spektrums hin genommen werden. Aber gerade für die lichtschwachen äußersten Farben des Spektrums hatte die Beobachtung Schwierigkeit.

Abweichend von der Fig. 22 ist in Maxwells Projektionen ferner, daß die Farbenkurve mit ihren beiden Enden in Rot und Violett sich der dritten Seite des Dreiecks anzulegen scheint.

Maxwells Resultat widerspricht einigermaßen meinem auf S. 108 angegebenen und durch direkten Versuch gewonnenen Satze, daß die Mischung zweier Spektralfarben immer etwas weißlicher ist, als die einfache Spektralfarbe, die jener Mischfarbe im Farbenton am nächsten kommt. Daraus würde folgen, daß die Farbenkurve nirgends gerade Strecken enthalten kann; denn die Farben, die auf einer geraden Linie liegen, können durch gegenseitige Mischung auseinander gewonnen werden. Dieser Widerspruch mag sich daraus erklären, daß gerade an den Grenzen des Farbendreiecks die Farbentöne sich relativ am schnellsten ändern müssen, und daß deshalb, wenn auch seine Seiten eine nur sehr schwache Konvexität, die bei Maxwells indirekterer Untersuchungsmethode nicht bestimmt zum Vorschein kommt, haben, und ihre Sehne deshalb dem Bogen sehr nahe liegt, doch auf der Sehne schon merklich anders aussehende Farben liegen können, als auf dem Bogen.

Maxwell hat ferner aus seinen Versuchen berechnet, in welcher Stärke die drei von ihm gewählten Grundfarben in den einzelnen prismatischen Farben vorhanden sind und danach die Kurven konstruiert, die ich in Fig. 21 schematisch angegeben habe. Seine Kurven haben etwas spitzere Gipfel als die der Fig. 21, und die des Rot steigt wieder am violetten Ende, die des Blau am roten Ende des Spektrums ein wenig.

Es wäre wohl noch zu wünschen, daß durch ähnliche Versuche, wie Maxwells, untersucht würde, ob man aus gelblichem Grün und Goldgelb wirklich ganz genau spektrales Gelb, aus äußerstem Rot und Indigblau wirklich genau das spektrale Violett usw. zusammensetzen kann, um danach die Form der Grenzen der spektralen Farbentafel noch direkter zu bestimmen. Zu bemerken ist, daß die beiden Beobachter bei Maxwell ihre Mischungen aus Spektralfarben nicht ganz gleich zusammensetzten, um sie dem Weiß gleich zu machen, und daß jeder von ihnen die Mischungen, welche der andere gemacht hatte, nicht als vollkommenes Weiß anerkannte. Auch zeigte die Kurve der Helligkeiten bei dem zweiten Beobachter (Maxwell selbst) in der Gegend der Linie *F* eine stärkere Vertiefung, als bei dem ersten. Maxwell macht es wahrscheinlich, daß daran die verschiedene Intensität der Pigmentierung des gelben Flecks schuld sei, da das gelbe Pigment (s. § 25) namentlich das Licht der Linie *F* zu absorbieren scheint. Deshalb erscheinen weiße Mischfarben, die jenes Blau enthalten, auch im indirekten Sehen nicht mehr weiß, was ich selbst ebenfalls schon früher bemerkt hatte (s. S. 133).

Da die prismatischen Farben also bei verschiedenen Individuen durch verschieden intensive Schichten gelbgefärbter Substanz gerade zu den mittleren Teilen der Netzhaut dringen müssen, so wird ihre Stärke dadurch verschieden geändert, und die von zwei Individuen entworfenen Farbendreiecke zeigen Abweichungen in der Verteilung der Farben, wie sie dadurch entstehen können, daß man die (übrigens willkürlich festzusetzenden) Helligkeitseinheiten der drei Grundfarben verändert. So wirkt in Maxwells eigenen Augen das Rot relativ stärker, das Blau relativ schwächer, als in denen des anderen Beobachters.

Auch die Farbenempfindungen, welche konstante elektrische Ströme hervorbringen, lassen sich nach Schelske mit objektiven Farben zusammensetzen und geben ähnliche Resultate. Der aufsteigende Strom mischt den gesehenen äußeren Farben bläulich violettes Licht zu, der absteigende Strom entzieht ihnen eine Quantität dieser Farbe. Es lassen sich sogar Farbengleichungen herstellen für zwei Farbenscheiben, deren eine sich auf einer aufsteigend durchflossenen Netzhauthälfte abbildet, die andere auf einer absteigend durchflossenen.

Die oben auf S. 128 erwähnte Rotblindheit an der Grenze des Sehfeldes hat Schelske näher studiert, indem er Farbengleichungen für die peripherischen Teile der Netzhaut herstellte zwischen Gelb und Blau einerseits, andererseits Rot, oder Grau, oder Grün. Von den Spektralfarben erschien die Gegend der Linie *F* fast weiß, die brechbareren blau, Violett dunkelblau, die weniger brechbaren grün, des äußerste Rot sehr schwach und farblos, graulich.

Daß farbenblinde Personen alle Farben für ihr Auge aus je zwei Grundfarben zusammensetzen können, ist durch viele Beobachter konstatiert worden. Zu einer genaueren Feststellung der fehlenden Grundfarbe haben diese Versuche aber noch nicht geführt, weil die Versuche mit Farbenscheiben, zu verschiedenen Zeiten und mit verschiedenen Individuen angestellt, ziemlich veränderliche Resultate geben. Einmal hat der Wechsel der äußeren Beleuchtung, das von den

gefärbten Zimmerwänden oder anderen Objekten reflektierte Licht sehr großen Einfluß, wie außer Maxwell auch E. Rose hervorgehoben hat. Dann bringt die Pigmentierung des gelben Flecks bei Farbenblinden natürlich eben solche Differenzen hervor, wie sie Maxwell bei Gesunden nachgewiesen hat. Bei der Beobachtung an Farbenscheiben, wo man Pigmentfarben benutzt, wird aber durch solche Absorption in dem gelben Pigment nicht bloß die Helligkeit dieser Farben, sondern auch ihre Mischung geändert, sie erhalten also, wenn man die zwei wirklichen Grundfarben und den Punkt des Schwarz in dem Farbendreieck feststellt, verschiedene Lage nach der Intensität der Pigmentierung des Auges. Wenn man aber drei solchen Pigmentfarben als Grundfarben im Farbendreieck konstante Lage gibt, so bekommen umgekehrt die wirklichen Grundfarben und das Schwarz verschiedene Lage für verschiedene Individuen. Solche Verschiedenheiten in der Lage des Schwarz hat nun E. Rose beobachtet bei Farbenblinden, auch wenn er sie gleichzeitig und unter übrigens gleichen äußeren Verhältnissen beobachtete, und daraus gefolgert, daß die Theorie von Th. Young nicht richtig sein könne. Indessen scheinen sich die vermeintlichen Widersprüche einfach aus den angegebenen Verhältnissen erklären zu lassen. Dies wird bestätigt durch Roses Bemerkung, daß zu konstanten Gleichungen nur zu kommen war, wenn die Farbenblinden immer denselben Punkt der Scheibe fixierten; jede Änderung des Fixationspunktes veränderte bei vielen von ihnen die Farbengleichung. Es zeigt sich hierbei die Verschiedenheit, welche die Pigmentierung in der Farbenempfindung verschiedener Teile derselben Netzhaut hervorbringt.

Daneben kommen nun auch Fälle unvollkommener Farbenblindheit vor, wie sie Herr Gladstone an sich beschreibt und wie sie auch von Herrn Hirschmann in meinem Laboratorium an einem Studierenden gefunden worden ist. Dabei wird die Einmischung ziemlich großer Quantitäten von Rot in eine Farbe nicht bemerkt. Übersteigt aber die Menge des Rot eine gewisse Grenze, so wird es wahrgenommen. Wird dies übersehen und betrachtet man ein solches Auge als ganz rotblind, so werden seine Farbengleichungen natürlich auch nicht genau mit den theoretischen Forderungen stimmen können.

Die von E. Rose bei Tageslicht angestellten Beobachtungen ergeben übereinstimmend mit Maxwells und meinen Beobachtungen den schwarzen Punkt in der Nähe des Scharlachrot, etwas nach dessen blauer Seite hinüber. Die meisten Beobachtungen aber hat E. Rose wohl nicht ganz zweckmäßig bei künstlicher Beleuchtung mit Photogen angestellt, welche relativ arm an Blau ist, und wo gerade der Gehalt an Blau nach der bei wechselndem Luftzuge wechselnden Temperatur der Flamme verhältnismäßig am meisten variiert. Da nun hierbei den Farbenblinden die Empfindung des Rot fehlt, Blau sehr wenig und in schwankender Menge in der Beleuchtung enthalten ist, noch dazu das brechbarere Blau, welches am meisten der Absorption in dem Pigment des gelben Flecks unterworfen ist und also bei solcher Beleuchtung in allen Farben für die Rotblinden Grün bei weitem überwiegen muß, so dürfen wir uns nicht wundern, wenn unter diesen Umständen die von verschiedenen farbenblinden Beobachtern gefundenen Farbengleichungen selbst an einem und demselben Abend nicht gut übereinstimmen. Ihre Punkte für Schwarz liegen in dem Farbendreieck alle zwischen Blau und Rot, aber, wie es durch die Schwäche des Blau bedingt wird, dem Blau näher, als bei Tagesbeleuchtung.

Es sind die Beobachtungen von E. Rose also durchaus nicht hinreichend, um die Gültigkeit der Theorie von Th. Young zu erschüttern.

Von den Mitteln, die derselbe Beobachter zur Untersuchung der Farbenblinden angewendet hat, ist noch zu erwähnen: erstens die Beobachtung von Interferenzspektren, entworfen durch Glasplatten mit feinen parallelen Linien, durch welche der Beobachtende nach einem erleuchteten Spalt hinsah. Zu jeder Seite des Spalts sieht man bekanntlich durch eine solche Platte eine Reihe von Spektren, von denen aber nur das erste ganz isoliert ist; das Rot des zweiten deckt schon das Violett des dritten. Farbenblinde, denen das rote Ende des Spektrums verkürzt ist, sehen auch das zweite Spektrum noch vom dritten getrennt. Hierbei wird aber natürlich viel auf die Beleuchtungsstärke des Spalts ankommen. Zu einer vorläufigen Orientierung über die Beschaffenheit eines untersuchten Auges scheint aber diese Beobachtungsweise recht brauchbar zu sein.

Sehr zweckmäßig hat zweitens Herr E. Rose statt des Farbenkreisels, dessen richtige Einstellung immer viel Zeit und Geduld erfordert, die Farben benutzt, in denen Quarzplatten im polarisierten Lichte erscheinen. In seinem Instrumente, welches er Farbenmesser nennt, folgen in einer Röhre hintereinander: Ein Nicolsches Prisma *A*, ein rechteckiges Diaphragma *B*, ein doppeltbrechendes Prisma *C*, eine Quarzplatte *D* von 5 Millimeter Dicke, ein zweites Nicolsches Prisma *E*, dann das Auge des Beobachters. Dieser erblickt zwei Bilder des Diaphragma *B*, entworfen von dem doppeltbrechenden Prisma *C*, beide Bilder dicht aneinander stoßend. Wegen der Drehung der Polarisationsebene in der Quarzplatte sind beide genau komplementär gefärbt und ihre Farben können durch Drehung des Nicolschen Prismas *A* geändert werden. Drehung des andern Nicolschen Prismas *E* verändert die Helligkeit der Farben, ohne ihre Zusammensetzung zu ändern, und wird gebraucht, um beide gleich hell zu machen. Ein normales Auge kann bei einer Quarzplatte von der genannten Dicke keine Farbengleichung zustande bringen, wohl aber ein rotblindes Auge. Die als gleich eingestellten Farben sind rot und blaugrün; auch hier machen übrigens verschiedene rotblinde Personen etwas verschiedene Einstellungen. Wenn man dickere Quarzplatten nimmt, oder mehrere gleichsinnig drehende Platten übereinander schichtet und noch eine aus zwei Prismen zusammengesetzte Platte von veränderlicher Dicke hinzufügt, wie sie in den Apparaten von Soleil zur Bestimmung des Zuckergehalts angewendet sind, kann man auch Farbengleichungen für das normale Auge herstellen, indem man ein Weiß aus Rot, Grün, Violett, ein zweites aus Gelb und Blau erhält. Doch zeigte sich auch hier zwischen den nicht farbenblinden Augen von Herrn Dr. Hirschmann und meinen eigenen ein Unterschied, wie ihn Maxwells Untersuchungen erwarten ließen.

In dem Santonin ist übrigens ein Mittel gefunden worden, um auch gesunde Augen vorübergehend violettblind zu machen. Damit die Wirkung schnell eintrete und nicht zu lange anhalte, nimmt man 10 bis 20 Gran*) santoninsauren Natrons. Nach 10 bis 15 Minuten fängt die Veränderung an und dauert mehrere Stunden. Übrigens treten dabei auch Übelkeiten, große Müdigkeit und Gesichtshalluzinationen auf, so daß ein solcher Versuch nicht ohne Beschwerde ist. Durch größere Dosen werden Tiere getötet. Die der Wirkung des Santonins unterworfenen Personen sehen helle Objekte grüngelb, dunkle

*) 1 Gran = 0,06 g. N.

Flächen dagegen mit Violett überzogen; das violette Ende des Spektrums verschwindet. Ihr Farbensystem ist dichromatisch, oder wenigstens annähernd so. Bei den Versuchen mit der Quarzplatte zeigte sich, daß bei mäßiger Stärke der Beleuchtung Farbengleichungen mit nur zwei Grundfarben im Santoninrausch hergestellt werden konnten, aber nicht bei größerer Lichtstärke. Die hergestellten Farbengleichungen blieben aber nicht längere Zeit konstant, sondern der Zustand veränderte sich fortdauernd ziemlich merklich. Es waren gelbe und violette Mischfarben, die für gleich erklärt wurden.

Der Querschnitt des Sehnerven, mit dem Augenspiegel betrachtet, zeigte sich nicht gelbgefärbt, so daß keine, oder wenigstens keine merkliche gelbe Färbung der Augenflüssigkeiten vorhanden war. Dagegen waren die Blutgefäße der Netzhaut stark gefüllt.

Beurteilen wir diese Erscheinungen nach den Voraussetzungen von Youngs Farbentheorie, so ist zu schließen, daß die Empfindlichkeit der violettempfindenden Nervenfasern an sich nicht verloren war, wohl aber die Endorgane (Zapfen der Netzhaut) unempfindlich gegen die Einwirkung des violetten Lichts geworden waren. Violettes und blaues Licht affizierte also das Auge nicht mehr, trotzdem offenbar aus inneren Erregungsursachen auf allen dunkleren Objekten Violett gesehen wurde. Es erinnert dies an das Grün, mit dem sich alle dunklen Flächen bedecken, wenn man ein rotes Glas dicht vor die Augen nimmt. Ob sich nun im Santoninrausch bloß der gewöhnliche Grad der inneren Netzhautreizung oder ein stärkerer bemerklich machte, ist schwer zu entscheiden. Ja, es scheint sogar fraglich, ob wir es hier nicht bloß mit einer Erregung der violettempfindenden Fasern durch das Santonin zu tun haben, welche die Empfindlichkeit des Auges gegen das objektive violette Licht durch Ermüdung herabsetzt und so eine unvollkommene Violettblindheit hervorbringt.

Die Veränderung der objektiven Farben läßt sich im ganzen als Violettblindheit betrachten; ob die Schwankungen des Urteils, welche E. Rose, sowohl bei den Farbenscheiben, wie mit den Polarisationsfarben des Quarzes beobachtet hat, von der wechselnden Injektion der Netzhautgefäße mit Blut, welches einigermaßen, wie ein absorbierendes farbiges Medium wirken könnte, herrühren, ist aus den Versuchen noch nicht zu entscheiden.

Daneben könnte man hier freilich ebenso, wie bei den natürlich Farbenblinden auch daran denken, daß nicht die Leistungsfähigkeit der Nervenfasern aufgehoben würde, sondern die Gestalt der Intensitätskurven Fig. 21 für die drei Arten lichtempfindlicher Elemente sich änderte, wobei dann eine viel größere Veränderlichkeit in dem Verhalten der objektiven Farben gegen das Auge eintreten könnte. Dafür ließe sich anführen, daß, wie E. Rose einige Male beobachtet hat, im Santoninrausch rotes und gelbes Licht gesehen, aber für violett gehalten wurde, als ob die Zapfen der violettempfindenden Fasern in ihrer Reaktion gegen Licht denen der rotempfindenden ähnlicher geworden waren. Andererseits scheint sich nach den Beobachtungen von Hirschmann diese Erscheinung hinreichend aus der Verbreitung subjektiven violetten Lichts über das ganze Gesichtsfeld, wie sie bei der Santoninwirkung eintritt, zu erklären.

---

1858. de Martini, *Effets produits sur la vision par la santonine C. R.* XLVII, 259—260.
— A. v. Baumgartner, Ein Fall ungleichzeitiger Wiederkehr für verschiedene Farben. Wiener Ber. XXIX. 257—258.
— G. Wilson, *A note on the statistics of colour blindness. Year book of facts.* 1858. p. 138—139.

1859. J. F. W. Herschel, *Remarks on colour blindness. Proc. of R. Soc.* X. 72—84. *Phil. Mag.* (4) XIX. 148—158.
— W. Pole, *On colour blindness. Phil. Trans.* CXLIX. 323—339. *Ann. de chimie.* (3) LXIII. 243—256.
— T. L. Phipson, *Action de la santonine sur la vue. C. R.* XLVIII. 593—594.
— Lefèvre, *Action de la santonine.* Ebenda. 448.
— E. Rose, Über die Wirkung der wesentlichen Bestandteile der Wurmblüten. Virchows Arch. XVI. 233—253.
1860. J. J. Oppel, Einige Beobachtungen und Versuche über partielle Farbenblindheit. Jahresber. d. Frankfurter Vereins. 1859—1860. S. 70—114.
— Gladstone, *On his own perception of colour.* Athen. 1860. II. 24. *Rep. of Brit. Assoc.* 1860. (2) p. 12—13.
— E. Rose, Über die Farbenblindheit durch Genuß der Santonsäure. Virchows Archiv. XIX. 522—536. XX. 245—290.
— A. de Martini, *Sur la coloration de la vue et de l'urine produite par la santonine. C. R.* L. 544—545. *Inst.* 1860. p. 108—109.
— Guépin, *Note sur l'action de la santonine sur la vue et son action thérapeutique. C. R.* LI. 794—795.
— J. C. Maxwell, *On the theory of compound colours and the relations of the colours in the spectrum. Proc. Roy. Soc.* X. 404—409; 484—486. *Phil. Trans.* CL. 57—84. *Phil. Mag.* (4) XXI. 141—146. *Cimento* XII. 33—37. *Rep. of Brit. Assoc.* 1860. (2) p. 16.
1861. J. J. Oppel, Nachträgliche Bemerkungen zu dem vorjährigen Aufsatze über Farbenblindheit. Jahresber. d. Frankf. Vereins. 1860—1861. S. 42—47.
— J. Z. Laurence, *Some observations on the sensibility of the eye to colour. Phil. Mag.* (4) XXII. 220—226.
— E. Rose, Über stehende Farbentäuschungen. Archiv für Ophthalm. VII (2). 72—108.
1862. J. J. Oppel, Zur Veranschaulichung der Achromatopsie für nicht damit Behaftete. Jahresber. d. Frankf. Vereins. 1861—1862. S. 48—55.
1863. R. Schelske, Über Farbenempfindungen. Archiv für Ophthalm. IX. 3. S. 39—62.
— E. Rose, Über die Halluzinationen im Santonrausch. Virchow Archiv. XXVIII.
1864. Aubert, Physiologie der Netzhaut. Breslau. S. 154—186.
1865. Schelske, Über Rotblindheit infolge pathologischen Prozesses. Archiv für Ophthalm. XI (1). 171—178.
— C. Bohn, Über das Farbensehen und die Theorie der Mischfarben. Poggendorffs Ann. CXXV. 87—118. (Versuch einer Theorie, ähnlich der von Grailich.)
1866. E. Brücke, Die Physiologie der Farben für die Zwecke der Kunstgewerbe. Leipzig.

## § 21. Von der Intensität der Lichtempfindung.

Die Intensität des objektiven Lichts ist gleich zu setzen der lebendigen Kraft der Ätherbewegung, und diese bei einfarbigem, geradlinig polarisiertem Lichte proportional dem Quadrate der größten Geschwindigkeit der Ätherteilchen. Wenn Licht aus verschiedener Quelle oder von verschiedener Polarisationsrichtung zusammentrifft, wird die Gesamtintensität gleich der Summe der einzelnen Intensitäten.

Wir wollen zunächst untersuchen, wie die Intensität der Lichtempfindung sich verhält, wenn die Intensität des objektiven Lichts sich verändert, ohne daß die Farbe geändert wird. Wir können diese Verhältnisse an weißem Lichte studieren; einfaches farbiges Licht verhält sich darin nicht anders.

Zunächst ist nachzuweisen, daß die kleinsten wahrnehmbaren Abstufungen der Lichtempfindung nicht gleichen Differenzen der objektiven Helligkeit entsprechen. Man beleuchte eine weiße Tafel mit einem schwachen Lichte, welches

die Helligkeit $h$ erzeuge, und stelle einen Körper auf, der auf die Tafel einen Schatten wirft, so daß innerhalb der Grenzen des Schattens die Tafel von jenem ersten Lichte nicht getroffen wird. Dann bringe man ein zweites Licht hinzu von der Helligkeit $H$, welche dadurch verändert werden kann, daß man dies zweite Licht der Tafel nähert und entfernt. Dann ist die objektive Helligkeit im Schatten $H$, außerhalb des Schattens $H + h$.

Ist nun die Helligkeit $H$ sehr gering, so wird das Auge den Schatten erkennen, d. h. die Helligkeit $H$ von der $H + h$ unterscheiden. Aber es scheint, daß wie groß auch $h$ sein mag, doch stets eine größere Helligkeit $H$ existiert, bei welcher der Schatten unsichtbar wird, bei welcher die Differenz $h$ der objektiven Helligkeit also nicht mehr eine wahrnehmbare Steigerung der Empfindung hervorbringt.

Ein Licht von der Stärke des Mondlichts wirft einen wahrnehmbaren Schatten auf weißes Papier. Bringt man eine gut brennende Lampe nahe an das Blatt, so verschwindet der Schatten. Wiederum verschwindet der Schatten, den das Lampenlicht wirft, wenn man die Sonne auf das Papier scheinen läßt. Ja, die Helligkeit der Flammenfläche einer gut brennenden Lampe mit ringförmigem Dochte ist für das Auge kaum noch von der doppelten Helligkeit zu unterscheiden. Es sind solche Flammen hinreichend durchsichtig, wie man leicht erkennt, wenn man ihr lichtschwaches Spiegelbild in einer unbelegten Glastafel betrachtet und dann eine zweite Flamme hinter die erste schiebt. Man erkennt dann die zweite in ihren Umrissen ganz genau. Sieht man aber mit bloßem Auge nach den beiden Flammen hin, so erkennt man die zweite wenigstens durch den hellsten Teil der ersten nicht mehr, oder höchstens nachdem man durch längeres Hinsehen die Intensität der Empfindung abgestumpft hat. Ebensowenig erkennt man so leicht mit bloßem Auge, daß der Rand der Flammenfläche, wo man der Länge nach durch die glühende Gasschicht hindurchsieht, ein sehr viel intensiveres Licht, als die Mitte hat, wo man die kleinste Tiefe der glühenden Schicht vor sich hat, was ebenfalls leicht sichtbar wird, wenn man die Flamme in einem unbelegten Glase gespiegelt betrachtet. Dahin gehört denn ferner auch die Tatsache, daß die Sterne bei Tage verschwinden, daß Bilder hinter einer Glasplatte verschwinden, wenn die Glasplatte spiegelt usw.

Während wir bisher die Differenz der Helligkeit konstant erhielten, und nur den absoluten Wert der ganzen Helligkeit veränderten, können wir auch die Differenz in demselben Verhältnis wachsen lassen, wie die Helligkeit wächst. Man bringe auf einer durchsichtigen Glastafel eine Zeichnung mit sehr verdünnter schwarzer Tuschfarbe an, oder lasse sie mit einem schwachen Hauch von Lampenruß anlaufen, und zeichne darin, oder am besten, man nehme ein photographisches auf durchsichtigem Glas ausgeführtes Bild, was teils sehr zarte, teils stärkere Schatten hat, und halte eine solche Zeichnung vor einen hellen Grund von immer steigender Helligkeit. Man wird finden, daß bei geringer Helligkeit des Grundes sehr zarte Schatten unsichtbar sind, bei größerer sichtbar werden, dann bei immer steigender Helligkeit eine ziemliche Zeit hindurch ungefähr denselben Grad von Deutlichkeit erhalten, endlich aber wieder anfangen zu verschwinden. Je stärker der Schatten in der Zeichnung ist, desto kleiner ist die Helligkeit, wo er anfängt sichtbar zu werden, und desto größer ist die Helligkeit, welche angewendet werden muß, damit er wieder verschwinde. Nun ist die Helligkeit des Schattens um einen bestimmten Teil

der ganzen Helligkeit kleiner, als die Helligkeit der lichten Stellen. Nennen wir letztere $H$, so können wir die Helligkeit des Schattens gleich $(1 - \alpha) H$ setzen, wo $\alpha$ einen für dieselbe Stelle der Zeichnung konstanten echten Bruch bezeichnet, so daß also die Differenz der Helligkeit zwischen der betreffenden Stelle der Zeichnung und dem hellen Grunde, welche $\alpha H$ ist, mit der Helligkeit $H$ gleichzeitig größer und kleiner wird. Trotzdem also bei steigender Helligkeit die Unterschiede der absoluten Helligkeit zwischen den verschieden beschatteten Teilen der Zeichnung größer werden, entsprechen diesen Unterschieden nicht mehr wahrnehmbare Unterschiede der Empfindung. Daraus geht nun hervor, daß es gewisse mittlere Grade der Lichtstärke geben muß, innerhalb welcher das Auge am empfindlichsten ist für eine Veränderung der Helligkeit um kleine Bruchteile ihrer Größe. Es sind die von uns gewöhnlich beim Lesen, Schreiben, Arbeiten gebrauchten, unserem Auge angenehmen und bequemen Grade der Helligkeit, also etwa von derjenigen ab, bei welcher man ohne Schwierigkeit lesen kann, bis zu der Helligkeit einer von den direkten Sonnenstrahlen getroffenen weißen Fläche. Innerhalb dieser Grenzen der Helligkeit, wo die Empfindlichkeit für Bruchteile ihr Maximum erreicht, ist die Größe der Empfindlichkeit auch nahehin konstant, wie sich denn überhaupt der Wert kontinuierlich veränderlicher Funktionen in der Nähe ihres Maximums verhältnismäßig wenig zu verändern pflegt. Es geht dies schon für die gewöhnliche Beobachtung aus dem Umstande hervor, daß man Gemälde und Zeichnungen, welche mannigfaltige Abstufungen des Schattens darbieten, ziemlich gleich gut bei Kerzenlicht und bei starkem Tageslicht erkennt, daß gewöhnlich bei starker Beleuchtung keine neuen Gegenstände und Schattenstufen darauf sichtbar werden, die man nicht schon bei schwacher Beleuchtung gesehen hätte. Ebenso bemerkt Fechner, daß wenn man durch verdunkelnde graue Gläser nach hellen Gegenständen, z. B. dem Himmel mit hellen Wolken, hinsieht, dadurch keine Abstufungen des Schattens verschwinden, die man vorher gesehen hätte, oder neu sichtbar werden. Dasselbe ergeben genauer die photometrischen Messungen. Es hat sich bei diesen Messungen im allgemeinen gezeigt, daß bei sehr verschiedenen Graden der Helligkeit die Differenz der Helligkeit, welche noch unterschieden werden konnte, nahe denselben Bruchteil der ganzen Helligkeit bildete. Die Größe dieser Differenz ist von Bouguer und Fechner in der Weise aufgesucht worden, daß dieselben eine weiße Tafel mit zwei gleichen Kerzenflammen beleuchteten, und einen Stab davor aufstellten, der nun zwei Schatten auf die Tafel warf. Das eine Licht wurde dann so weit entfernt, bis der entsprechende Schatten aufhörte sichtbar zu sein. Ist $a$ die Entfernung des näheren Lichts von der Tafel, $b$ die Entfernung des entfernteren, so verhält sich die Beleuchtungsstärke der Tafel durch beide Lichter etwa $a^2 : b^2$. Bouguer fand, daß das eine Licht etwa 8 mal, Fechner mit Hilfe von Volkmann und anderen Beobachtern, daß es ungefähr 10 mal so weit, als das andere, entfernt sein müsse, damit der Schatten verschwinde, so daß Bouguer also $\frac{1}{64}$ der Lichtstärke, Fechners Freunde dagegen $\frac{1}{100}$ noch unterscheiden konnten. Arago bemerkte, daß bei der Bewegung noch feinere Unterschiede erkannt werden konnten, und kam unter günstigsten Bedingungen bis auf $\frac{1}{131}$. Masson wendete zur Prüfung rotierende weiße Scheiben mit kleinen schwarzen Sektoren an.

Er fand, daß bei schwachem Gesicht zuweilen nur Unterschiede von $\frac{1}{50.}$ erkannt wurden, bei guten Augen aber zuweilen noch weniger als $\frac{1}{120}$. Er fand außerdem, daß die Grenze der Empfindlichkeit auch für instantane Beleuchtung durch den elektrischen Funken von der Lichtstärke ziemlich unabhängig ist. Bei dieser Beleuchtung werden nämlich, wenn sie stark genug ist, die schwarzen und weißen Sektoren für einen Augenblick sichtbar. Läßt man nun die rotierende Scheibe dauernd von einer Lampe mit der Helligkeit $L$ beleuchten und dann auch von einem elektrischen Funken mit der Helligkeit $l$, so hat man für einen Augenblick am Orte der weißen Sektoren die Helligkeit $L + l$, am Orte der schwarzen nur die Helligkeit $L$, und man wird die Sektoren nur erkennen, wenn $L + l$ von $L$ unterschieden werden kann. Veränderte man die Entfernung beider Lichtquellen von der Scheibe, so mußten $L$ und $l$ proportional verändert werden, um an der Grenze der Empfindlichkeit des Auges zu bleiben, woraus denn folgt, daß dasselbe Gesetz wie für konstantes Licht, auch für die Wahrnehmbarkeit instantaner Lichtunterschiede gilt.

Fechner hat die Tatsache, daß innerhalb eines großen Intervalls der Helligkeit die kleinsten wahrnehmbaren Differenzen der Lichtempfindung (nahehin) konstanten Bruchteilen der Helligkeit entsprechen, zur Aufstellung eines allgemeineren Gesetzes benutzt, welches er als ein psychophysisches bezeichnet, und welches auch in anderen Gebieten der Sinnesempfindungen sich bewährt. So erscheinen uns namentlich Differenzen der Tonhöhe als gleich groß, wenn die Differenzen der Schwingungsdauer gleiche Teile der ganzen Schwingungsdauer betragen. Ähnlich verhält es sich ferner nach E. H. Webers Untersuchungen mit unserer Fähigkeit, die Differenzen von Gewichten und Lineargrößen zu erkennen. Wie wir nun die Tonhöhe messen durch den Logarithmus der Schwingungszahl, so erscheint es passend, die Empfindungsstärke ähnlich zu messen, indem wir in diesem wie in jenem Falle gleich deutlich wahrnehmbare Unterschiede $dE$ der Empfindungsstärke $E$ als gleich groß ansehen. Dann ist also innerhalb weiter Grenzen der Helligkeit $H$ nahehin

$$dE = A\frac{dH}{H},$$

wo $A$ eine Konstante ist. Daraus folgt mittels der Integration

$$E = A\log H + C,$$

wo $C$ eine zweite Konstante bezeichnet. Wenn wir für die Helligkeit $h$ die Empfindungsstärke gleich $e$ setzen, wird die letztere Gleichung:

$$E - e = \log\frac{H}{h}.$$

Fechner hat gezeigt, daß diese Art, wie das Auge Helligkeiten mißt, auch bei der Aufstellung der Sterngrößen einen bestimmenden Einfluß geübt hat. Die Größenklassen der Sterne hat man bestimmt nach dem Eindruck, den sie auf das menschliche Auge machen, zunächst ohne photometrische Messungen der objektiven Lichtmenge. Erst in neuerer Zeit sind dergleichen hinzugekommen, und erlauben nun die wirkliche Helligkeit mit der angenommenen Größenklasse zu vergleichen. Fechner hat eine solche Vergleichung nach den

photometrischen Bestimmungen von J. Herschel und Steinheil ausgeführt, und findet die Größenklasse $G$ ausgedrückt, für Herschels Messungen durch die Formel

$$G = 1 - 2{,}8540 \log H,$$

für Steinheils Messungen durch

$$G = 2{,}3114 - 2{,}3168 \log H,$$

welche Formeln mit den oben aufgestellten in Übereinstimmung sind, wenn man bemerkt, daß die Größenklassen steigen, wenn die Sterngrößen fallen, und ebenso findet sich sehr genügende Übereinstimmung zwischen den Formeln und den Beobachtungen. Auch für die Messungen von Struve hat Fechner eine hinreichende Übereinstimmung mit seinem Gesetze nachgewiesen. Dasselbe Gesetz ist übrigens auch von Babinet[1] ausgesprochen, welcher die Zahl, die dem Koeffizienten von $\log H$ in Fechners Formel entspricht, zu 2,5 angibt nach Beobachtungen von Johnson und Pogson.

Daß das hier aufgestellte Gesetz für die Empfindungsstärke nicht bei sehr kleinen und nicht bei sehr großen Helligkeiten gilt, erklärt Fechner durch den Einfluß von störenden Nebenumständen. Bei sehr geringen Helligkeiten muß sich nämlich der Einfluß des subjektiven Eigenlichts des Auges merklich machen. Neben der Reizung durch äußeres Licht ist immer noch eine Reizung durch innere Einflüsse vorhanden, deren Größe wir gleich setzen können der Reizung durch ein Licht von der Helligkeit $H_0$. Dann wird also genauer der Ausdruck für die kleinsten wahrnehmbaren Stufen der Empfindungsstärke

$$dE = A \frac{dH}{H + H_0}$$

oder

$$dH = \frac{1}{A}(H + H_0)\, dE,$$

woraus folgt, daß die Steigerung der Helligkeit etwas größer sein muß, um wahrgenommen zu werden, als wenn $H_0$ gleich Null wäre, und namentlich wird der Unterschied für kleine Werte von $H$ bedeutend werden. Fechner hat nun darauf eine Methode gegründet, die Stärke des Eigenlichts $H_0$ zu vergleichen mit objektivem Lichte, welche Methode aber allerdings voraussetzt, daß an der unteren Grenze der Helligkeit die Wirksamkeit des besprochenen Gesetzes keine andere Störung erleidet, als eben die durch das Eigenlicht. Wenn ein Auge, welches die Differenz von $\frac{1}{100}$ der Lichtstärke erkennen kann, eine Fläche betrachtet, von der ein Teil durchaus kein äußeres Licht empfängt, ein anderer Teil mit der Helligkeit $h$ beleuchtet ist, so ist mit Berücksichtigung des Eigenlichts des Auges die scheinbare Helligkeit der unbeleuchteten und beleuchteten Teile $H_0$ und $H_0 + h$. Ist nun $h$ die kleinste wahrnehmbare Helligkeit, so muß nach Fechners Betrachtungsweise sein $h = \frac{1}{100} H_0$ und dadurch wäre die Helligkeit $H_0$ des Eigenlichts gemessen durch ein objektives Licht. Versuche wurden ausgeführt von Volkmann, welcher die Stärke des

[1] *Comptes rendus.* 1857. p. 358.

Eigenlichts $H_0$ fand gleich der Helligkeit einer schwarzen Sammetfläche, beleuchtet durch eine Stearinkerze aus 9 Fuß Entfernung.

Die Abweichung von dem Gesetze an der oberen Grenze könnte man mit FECHNER wohl darauf schieben, daß das Organ zu leiden beginnt. Die inneren Veränderungen im Nerven, welche den Eindruck des Reizes auf das Gehirn übertragen müssen, können eben eine bestimmte Größe nicht überschreiten, ohne das Organ zu zerstören, und jeder Wirkung des Reizes ist daher eine obere Grenze gesetzt, welcher denn notwendig auch ein Maximum der Empfindungsstärke entsprechen muß.

Übrigens ist denn doch zu bemerken, daß diese Umstände, welche es auch sein mögen, die an der oberen und unteren Grenze der Helligkeit die Gültigkeit von FECHNERS Gesetz stören, auch in den mittleren Graden der Helligkeit ihren Einfluß bei genauer Beobachtung geltend machen, was natürlich nicht verhindert, daß jenes Gesetz als eine erste Annäherung an die Wahrheit stehen bleibt. Allerdings sind die meisten Gemälde, Zeichnungen und Photographien von den gewöhnlich vorkommenden Gegenständen der Darstellung gleich gut bei sehr verschiedenen Graden der Lichtstärke zu erkennen. Aber ich habe doch auch in Photographien Schattenabstufungen gefunden, die nur bei einer bestimmten und eng begrenzten Lichtstärke ganz deutlich hervortreten. Dazu gehören namentlich Landschaftsbilder, in denen sehr ferne im Nebel halb verschwimmende Bergketten dargestellt sind, am auffallendsten aber war es mir bei einigen stereoskopischen Photographien von Alpenlandschaften auf Glas, in denen sich Teile der Firnmeere oder ganz mit Schnee bedeckte Bergspitzen zeigen. Solche Schneeflächen sehen bei Lampenlicht oder mäßig starkem Tageslicht wie einförmige weiße Flächen aus, während sie gegen den hellen Himmel gekehrt noch zarte Schatten zeigen, die eine Modellierung der weißen Schneeflächen andeuten, und die bei noch stärkerem Lichte wieder verschwinden. In Photographien kann man so zarte Schatten natürlich nur durch Zufall finden, in Gemälden oder Zeichnungen kann man sie nicht erwarten, dagegen geben die rotierenden Scheiben ein leichtes Mittel ab, sehr zarte Schatten zu erzeugen, deren Lichtstärke in jedem gewünschten Verhältnis zur Helligkeit des weißen Grundes steht, wie sie denn auch MASSON schon zu photometrischen Versuchen gebraucht hat. Leicht zu erhalten sind solche Schatten, wenn man der Scheibe die Zeichnung wie in Fig. 30 gibt. Man zieht längs eines oder zweier Radien mit einer Ziehfeder einen unterbrochenen Strich, dessen Teile alle die gleiche Dicke haben. Bei der Rotation der Scheibe geben diese schwarzen Striche graue Kreise auf der Scheibe. Ist $d$ die Breite der Striche, $r$ die Entfernung eines Punktes eines schwarzen Strichs vom Mittelpunkte der Scheibe, so ist die Helligkeit $h$ des grauen Streifens, der bei der Rotation entsteht, wenn wir die Helligkeit der Scheibe gleich 1 setzen

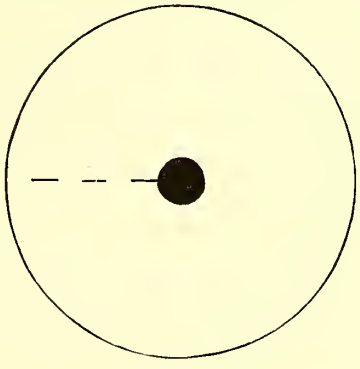


Fig. 30.

$$h = 1 - \frac{d}{2r\pi}.$$

Die grauen Streifen unterscheiden sich also desto weniger von der Helligkeit der Scheibe, je größer $r$ ist; die inneren sind dunkler, die äußeren heller,

und man erhält eine Folge sehr zarter Abstufungen. Beim Versuche hat man nur zu untersuchen, wie weit die Ränder der grauen Streifen noch zu erkennen sind. Man erkennt sie besser, wenn man mit dem Blicke zu den verschiedenen Stellen eines Kreises hin- und hergeht, als wenn man eine Stelle fixiert; im letzteren Falle verschwinden die schwächeren Kreise schnell wieder, auch wenn man sie vorher gesehen hat. Doch erkennt man sie gewöhnlich auch nicht gleich beim ersten Hinsehen nach der Scheibe, sondern man muß letztere erst eine Zeitlang aufmerksam betrachten. Übrigens muß man darauf achten, daß die Scheibe schnell genug umläuft, daß die grauen Kreise ganz kontinuierlich erscheinen, und nicht flimmern. Im letzteren Falle erkennt man auch die schwächeren Kreise, weil dann bei jedem einzelnen Vorübergang eines schwarzen Streifens der Lichteindruck sich so weit zu schwächen Zeit hat, daß man die Verdunkelung bemerkt. Ich konnte an hellen Sommertagen am Fenster bei Bewegung des Blicks noch einen Rand scharf sehen, wo der Unterschied der Helligkeit $\frac{1}{133}$ war, und verwaschen erschien mir auch noch ein Rand von $\frac{1}{150}$, auf Augenblicke sogar einer von $\frac{1}{167}$ Unterschied. Etwas mühsamer und anstrengender erschienen die Wahrnehmungen bis zu $\frac{1}{150}$ bei direkter Sonnenbeleuchtung der Scheibe. In der Mitte des Zimmers konnte ich zu derselben Zeit nur Ränder von $\frac{1}{117}$ Unterschied wahrnehmen, den von $\frac{1}{133}$ nur selten und unbestimmt.

Also auch hier zeigt sich, daß eine gewisse enger begrenzte Stärke der Erleuchtung die größte Empfindlichkeit der Wahrnehmung gewährt. Wir dürfen also in der vorher aufgestellten Gleichung

$$dE = A\frac{dH}{H}$$

$A$ nicht als ganz unveränderlich betrachten, auch nicht innerhalb der gewöhnlichen Beleuchtungsstärken. $A$ muß vielmehr von $H$ abhängen, wenn es auch bei mittleren Beleuchtungsstärken nahehin konstant ist, und ebenso wird die daraus hergeleitete Integralformel

$$E = A\log H + C$$

nur annähernd richtig sein für die mittleren Werte der Helligkeit. Daß eine solche Formel nicht genügen kann, wird sich noch weiter zeigen bei Vergleichung der Empfindungsstärke für verschiedene Farben.

Auch wenn wir noch das Eigenlicht des Auges berücksichtigen, und setzen

$$dE = A\frac{dH}{H+H_0}$$

$$E = A\log(H+H_0) + C,$$

genügt die Formel den Tatsachen nicht ganz, da ihr zufolge die Empfindlichkeit zunehmen müßte, je weiter die Helligkeit gesteigert würde. Die oben angeführten Tatsachen sprechen vielmehr dafür, daß für sehr große Werte von $H$ die Empfindungsstärke einen Maximalwert erreicht, den sie nicht mehr über-

schreitet, auch wenn $H$ noch steigt. Dann muß also $\frac{dE}{dH}$ gleich Null werden. Demnach würden wir auch in der letzten Differentialgleichung noch $A$ als eine Funktion von $H$ betrachten müssen, welche für mäßige Werte von $H$ nahehin konstant ist, für unendlich große aber gleich Null wird. Die einfachste Funktion dieser Art wäre

$$A = \frac{a}{b + H},$$

worin man sich $b$ als sehr groß vorstellen muß. Setzen wir also

$$dE = \frac{a\,dH}{(b + H)(H_0 + H)},$$

so wird

$$E = \frac{a}{b - H_0} \log\left[\frac{H_0 + H}{b + H}\right] + C.$$

Erst durch eine solche Formel würden wir hoffen dürfen, die Erscheinungen vollständig auszudrücken. Darin würde $C$ das Maximum der Empfindungsstärke bedeuten, welches für unendlich große Werte von $H$ eintritt, und das Maximum der Empfindlichkeit würde für $H = \sqrt{b\,H_0}$ eintreten.

Durch die hier nachgewiesene Abhängigkeit der Empfindungsstärke von der Lichtstärke erklärt sich eine Tatsache, die mir oft aufgefallen ist, daß nämlich in dunkeln Nächten helle Gegenstände verhältnismäßig zu ihrer Umgebung viel heller erscheinen, als bei Tage, so daß man sich zuweilen der Voraussetzung nicht erwehren kann, sie seien selbstleuchtend. Bei sehr geringen Lichtstärken können wir nämlich die Empfindungsstärke der Lichtstärke proportional setzen bei starker Beleuchtung dagegen ist die Empfindung für hellere Objekte relativ schwächer. Da wir nun gewöhnt sind, die Helligkeit der uns bekannten Objekte bei starker Beleuchtung zu vergleichen, so erscheinen uns bei schwacher Beleuchtung die hellen Gegenstände relativ zu hell, die dunkeln zu dunkel. Diesen Umstand benutzen auch die Maler in Mondscheinlandschaften, um den Eindruck schwacher Beleuchtung hervorzubringen. Sie heben die lichten Stellen viel greller heraus, als wenn sie Tageslicht darstellen.

Wir wenden uns nun zur Vergleichung der Intensität verschiedenfarbigen Lichtes. Wenn wir die Intensität des objektiven einfarbigen und verschiedenfarbigen Lichts gemessen denken durch die lebendige Kraft der Ätherbewegung, so müssen wir sie nach dem allgemeinen Gesetze von der Erhaltung der Kraft proportional setzen der Wärmemenge, welche bei der Absorption des betreffenden Lichts entwickelt wird. Es ist dies bisher das einzige physikalische Mittel, durch welches wir die Intensität von Ätherwellen verschiedener Schwingungsdauer vergleichbar machen können. Wenn wir die Leuchtkraft der Ätherwellen verschiedener Schwingungsdauer mit dem Auge vergleichen, so zeigt sich, wie schon in § 19 auseinandergesetzt wurde, daß die Intensität der Lichtempfindung keineswegs proportional ist der durch die Wärmeentwicklung gemessenen lebendigen Kraft dieser Ätherschwingungen. Wenn wir ein Spektrum mittels eines Steinsalzprismas entwerfen, welche Substanz unter allen am gleichmäßigsten Strahlen verschiedener Art durchgehen läßt, so liegt, wie MELLONI gefunden hat, das Maximum der Wärme jenseits des äußersten Rot, wo das Auge kein Licht mehr empfindet, und die Wärme nimmt im Spektrum kontinuierlich vom

Violett zum Rot zu, während das Maximum des Lichts im Gelb sich findet. Ebenso habe ich schon oben bemerkt, daß die ultravioletten Strahlen, wenn sie durch Fluoreszenz in Strahlen mittlerer Brechbarkeit verwandelt werden, an Leuchtkraft außerordentlich zunehmen, während nicht anzunehmen ist, daß die lebendige Kraft ihrer Schwingungen dadurch vermehrt werden könne. Die Stärke der Lichtempfindung hängt also nicht allein ab von der lebendigen Kraft der Ätherschwingungen, sondern auch von der Schwingungsdauer derselben. Es folgt daraus, daß alle mittels des Auges vollzogenen Vergleichungen der Stärke verschiedenartig zusammengesetzten Lichts keinen von der Natur des Auges unabhängigen objektiven Wert haben.

Wir haben gefunden, daß für gleichartiges Licht die Empfindung nicht proportional der objektiven Lichtstärke wächst, sondern daß die Empfindungsstärke eine verwickeltere Funktion der Lichtstärke ist. Bei der Vergleichung verschiedenfarbigen Lichts stellt sich nun heraus, daß die Empfindungsstärke für verschiedenartiges Licht eine verschiedene Funktion der Lichtstärke ist. Purkinje* hat schon bemerkt, daß Blau bei schwächstem Lichte gesehen wird, Rot erst bei stärkerem. Später hat Dove darauf aufmerksam gemacht, daß wenn man die Lichtstärke von Flächen, die mit verschiedenen Farben überzogen sind, bei verschiedener Beleuchtungsstärke vergleicht, bald die eine, bald die andere heller aussieht. Im allgemeinen überwiegen bei großer Beleuchtungsstärke die weniger brechbaren roten und gelben Farben, bei geringer Beleuchtungsstärke die brechbareren blauen und violetten Farben. Wenn ein rotes und blaues Papier bei Tageslicht gleich hell aussehen, so erscheint bei Einbruch der Nacht das blaue heller, daß rote oft ganz schwarz. Ebenso findet man, daß in Gemäldegalerien bei sinkendem Abend (einen trüben Himmel und fehlende Abenddämmerung vorausgesetzt) die roten Farben zuerst schwinden, die blauen am längsten sichtbar bleiben. Und in der dunkelsten Nacht, wenn alle anderen Farben fehlen, sieht man noch das Blau des Himmels. Noch auffallender habe ich diese Erscheinungen gefunden, wenn man prismatische Farben benutzt. Wenn man den im vorigen Paragraphen beschriebenen in Fig. 27 dargestellten Apparat zur Mischung von Spektralfarben benutzt, und vor das Feld, welches mit den beiden Farben beleuchtet ist, ein senkrechtes Stäbchen hält, so wirft dieses zwei verschiedenfarbige Schatten. Da nämlich die beiden farbigen Lichter in verschiedener Richtung, nämlich von den beiden Spalten des letzten Schirms ($S$, Fig. 27) her auf das erleuchtete Feld fallen, so entwirft jedes den betreffenden Schatten in verschiedener Richtung. Wäre also z. B. Violett und Gelb gemischt, so würden wir einen Schatten haben, der nicht vom Violett, wohl aber vom Gelb beleuchtet ist, und also gelb erscheint, einen anderen, der nicht vom Gelb, wohl aber vom Violett beleuchtet ist, und violett erscheint, während der Grund weiß oder weißlich wäre. Macht man nun den Spalt des Schirms breiter, welcher das Violett durchläßt, so wird das Violett, also auch der violette Schatten lichtstärker, und man kann durch eine passende Regulierung der beiden Spalten leicht bewirken, daß der violette Schatten dem Auge ebenso hell erscheint, wie der gelbe. Wenn man nun den einfachen Spalt des ersten Schirms, durch welchen das vom Heliostaten reflektierte Licht zum Prisma tritt, erweitert oder verengert, so verstärkt oder schwächt man die ganze Lichtmasse, die in den Apparat tritt, und zwar alle ihre einzelnen

* Zur Physiologie der Sinne. II. 109. Vergl. hierzu die Zusätze in dem Zusatzkapitel I. I, B., 1—5. N.

farbigen Lichter in gleichem Verhältnisse, so auch in gleichem Verhältnisse das Licht des gelben und violetten Schattens. Dabei ergibt sich, daß schon bei einer geringen Verstärkung des Lichts das Gelb stärker, bei einer geringen Schwächung das Gelb schwächer als das Violett erscheint. Dieser Unterschied ist viel geringer, wenn man zwei Farben aus der weniger brechbaren Hälfte des Spektrums nimmt, größer, wenn beide aus der brechbareren Hälfte sind, am größten, wenn man sie von den Enden des Spektrums nimmt.

In Fig. 31 mögen die horizontalen Koordinaten längs der Linie $ad$ den objektiven Lichtstärken proportional sein, die vertikalen der Intensität der Lichtempfindung. Es stelle $aebg$ die Kurve für die Intensität der Empfindung des gelben Lichtes dar, und es seien die Einheiten des gelben und violetten Lichtes so gewählt, daß für die Lichtmenge $ac$ die Empfindungsstärke in beiden Lichtarten die gleiche sei, so folgt aus den angegebenen Tatsachen, daß die Kurve, welche die Empfindungsstärke des violetten Lichts ausdrückt, die Lage $a\varepsilon b\gamma$ gegen die frühere haben müsse. Verkleinert man beide Lichtmengen im Verhältnis $af:ac$, so findet man für das gelbe Licht die Empfindungsstärke, ausgedrückt durch die Linie $fe$, kleiner als die Empfindungsstärke $f\varepsilon$ des Violett. Umgekehrt, wenn man beide Lichtmengen auf die Größe $ad$ bringt, findet sich die zugehörige Empfindungsstärke des Gelb $dg$ größer, als die des Violett $d\gamma$.

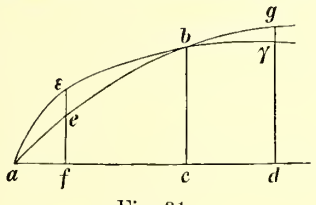


Fig. 31.

Es geht hieraus hervor, daß es nicht möglich ist, für verschiedenfarbiges Licht Maßeinheiten so festzusetzen, daß das Auge Quantitäten beider Lichter, welche nach diesen Maßeinheiten gemessen gleich groß sind, auch immer als gleich hell empfindet. Die Funktionen, welche die Abhängigkeit der Empfindungsstärke von der objektiven Lichtstärke ausdrücken, sind vielmehr für verschiedenfarbiges Licht von verschiedenem Grade.

Wenn man aus zwei Spektralfarben Weiß zusammengesetzt hat, und nun die Intensität der beiden farbigen Lichter in gleichem Verhältnis vermehrt oder vermindert, so daß das Mischungsverhältnis unverändert bleibt, so bleibt auch die Mischfarbe unverändert weiß, trotzdem dabei das Verhältnis der Empfindungsstärke für die beiden gemischten sich wesentlich verändern kann. Mischt man z. B. in dem früher beschriebenen Apparate Violett und Grüngelb zu Weiß, so kann man mittels Verengerung des Spaltes die Menge des grüngelben Lichts verringern, bis es gleich lichtstark, wie das Violett erscheint, und da die Menge des durchgegangenen Lichts der Breite des Spaltes proportional ist, so kann man auch durch Messung des Spaltes das Verhältnis bestimmen, in welchem die Lichtmenge verringert worden ist. So habe ich gefunden, daß das Violett, welches mit einer gewissen Menge Grüngelb Weiß gibt, bei stärkerer Helligkeit so hell wie $^1/_{10}$ des Grüngelb, bei schwächerer Helligkeit dagegen wie $^1/_5$ des Grüngelb erscheint, während in beiden Fällen das Verhältnis der objektiven Lichtquanta das gleiche ist. In der Mischung von Indigblau und Gelb erschien das Blau bei größerer Helligkeit so hell wie $^1/_4$, bei schwächerer wie $^1/_3$ des Gelb. Bei den weniger brechbaren Komplementärfarben waren die Unterschiede zu klein, um gemessen zu werden. Wenn wir also Weiß von verschiedener Helligkeit zusammensetzen, so geschieht dies durch Lichtquanta der Komplementärfarben, die ein konstantes Verhältnis der objektiven Intensität, aber ein sehr wechselndes Verhältnis der subjektiven Helligkeit zueinander

haben. Es folgt daraus, daß wenn wir die Maßeinheiten verschiedenfarbigen Lichts, wie im vorigen Paragraphen ausgeführt wurde, nach den Mischfarben festsetzen, diese Einheiten wenig oder gar nicht von der Lichtstärke abhängig sein werden.

Daß die Mischfarben dem Auge bei verschiedener Lichtstärke ziemlich unverändert erscheinen, während doch das Verhältnis der Stärke, mit der die gemischten Farben auf den Sehnervenapparat wirken, sich wesentlich verändert, scheint mir daraus zu erklären zu sein, daß das Sonnenlicht, welches wir bei Tage als das normale Weiß betrachten, selbst bei verschiedener Lichtstärke in ähnlicher Weise seine Farbe ändern muß, wie die anderen weißen oder weißlichen Farbenmischungen, mit denen wir es vergleichen. Eine Farbenmischung, welche ebenso aussieht, wie das bis zu demselben Grade der Helligkeit abgeschwächte Sonnenlicht, ist für uns weiß. Wenn also auch in der betreffenden Farbenmischung bei schwachem Lichte der Eindruck des Blauen überwiegender ist, als bei starkem Lichte, so erscheint sie doch nicht bläulich weiß, weil in dem ebenso weit abgeschwächten Sonnenlichte der Eindruck des Blau ungefähr in demselben Maße überwiegen muß. Daß aber wirklich im schwachen Sonnenlichte der Eindruck des Blau, im starken der des komplementären Gelb überwiegt, davon überzeugt man sich leicht bei einiger Achtsamkeit. In Gemälden wird der Eindruck grellen Sonnenscheins immer durch überwiegend gelben Farbenton, Mondschein oder Sternenlicht durch blauen Ton ausgedrückt. Der Maler, welcher nicht über Abstufungen von Lichtstärke verfügen kann, wie die Natur, welche er nachahmt, sucht durch Nachahmung des veränderten Farbentons den Eindruck der Lichtstärke zu ergänzen. Ebenso gehört hierher, daß uns Landschaften bei trübem Wetter, durch ein gelbes Glas gesehen, den Eindruck einer grellen Sonnenbeleuchtung machen, während ein blaues Glas auch einer sonnenhellen Landschaft das Ansehen einer sogenannten kalten Beleuchtung gibt.

Schon oben ist erwähnt worden, daß auch der Eindruck der einfachen Farben sich in derselben Weise ändert, so daß sie sich bei steigender Lichtstärke gleichsam mit Gelb zu mischen scheinen. Rot und Grün gehen direkt in Gelb über, Blau wird, wie es bei Mischung mit Gelb geschehen würde, weißlich.

Es folgt hieraus, daß bei sehr großer Lichtintensität die Unterscheidung der Farbentöne unvollkommener ist, als bei mittlerer Helligkeit. Ebenso ist diese Unterscheidung aber auch bei sehr geringer Lichtintensität unvollkommen, womit zusammenfällt, daß sie auch bei Farben, welche sehr kleine Teile des Gesichtsfeldes bedecken, unvollkommener ist, als bei breiteren Feldern. Wenn nämlich das Netzhautbild eines farbigen Feldes kleiner ist, als die empfindenden Netzhautelemente, so wird das betreffende Netzhautelement nicht mehr in voller Intensität erregt, und um so weniger, je kleiner der Teil des Elements ist, der vom Bilde der farbigen Fläche getroffen wird.

Die hier besprochenen Abänderungen der Farbenempfindung mit der Intensität des Lichtes erklären sich aus der Annahme von Th. Young, daß es dreierlei Arten von Nerven in der Netzhaut gebe, rotempfindende, grünempfindende, violettempfindende, sobald man, wie wir getan, annimmt, daß von allem Licht, auch von homogenem, jede Art von Nerven erregt, aber in sehr verschiedener Stärke erregt werde, und daß in den drei Arten von Nerven die Empfindungsstärke eine verschiedene Funktion der Lichtstärke sei, so daß sie in den violettempfindenden Nerven bei steigender Intensität anfangs schneller, später lang-

samer wachse, als in den grünempfindenden, in diesen ebenso im Vergleich mit den rotempfindenden.

Erregt das violette Licht des Spektrums stark die violettempfindenden, schwach die grünempfindenden, noch schwächer die rotempfindenden Nerven, so wird bei schwachem Lichte die Empfindung des Violett überwiegen; bei starkem Lichte, wo sich die Empfindung des Violett ihrem Maximum nähert, wird die Empfindung des Grün im Vergleich zu jener eine merklichere Größe gewinnen können, später auch jene des Rot, so daß anfangs die Empfindung des violetten Lichts durch zugemischtes Grün in Blau, später durch zugemischtes Grün und Rot in Weiß übergehen muß.

Wenn wir ferner annehmen, daß die grünen Strahlen des Spektrums stark die grünempfindenden Nerven, mäßig die rotempfindenden und violettempfindenden erregen, so muß die Empfindung des Grün erst in Gelb übergehen, weil die Empfindung des Rot mit der Lichtstärke schneller zunimmt, als die des Violett, endlich wenn sich alle drei dem Maximum nähern, in Weiß. Ferner haben wir für die roten Strahlen angenommen, daß sie stark die rotempfindenden Nerven, schwach die grünempfindenden, noch schwächer oder gar nicht die violettempfindenden erregen; daraus würde sich erklären, daß die Empfindung starken roten Lichts in Gelb übergeht.

Die Unterscheidung des Farbentons würde nun darauf beruhen, daß das Verhältnis der Lichtmenge, welche jeden von diesen Nerven erregt, durch Vergleichung ihrer Empfindungsstärke wahrgenommen wird. Nun haben wir gesehen, daß das Intensitätsverhältnis zweier Lichtmengen sich bei einer gewissen mittleren Helligkeit am besten vergleichen läßt, daher auch die Unterscheidung der Farbentöne bei mittlerer Helligkeit am genauesten sein muß. Die Anwendung dieser Betrachtung auf sehr lichtstarke Farben wird aus dem bisher Gesagten schon klar sein. Wenn bei gemischten Farben alle drei Nervenarten dem Maximum ihrer Erregung nahe sind, wird notwendig jede Farbe sich dem Weiß immer mehr nähern müssen. Nehmen wir im Gegenteil an, daß die violettempfindenden Nerven in den schwächsten wahrnehmbaren Grad von Erregung versetzt seien, so wird nicht unterschieden werden können, ob daneben noch ein etwas geringerer Grad von Erregung der beiden anderen Nerven vorhanden sei, ob also die Farbe des Lichts reinem Violett, oder Indigblau oder Purpur oder bläulichem Weiß entspreche, und somit wird also auch bei ganz schwachem Lichte die Unterscheidung des Farbentons unvollkommen sein.

Daraus, daß die Empfindungsstärke der objektiven Lichtstärke nicht proportional ist, erklärt sich nun weiter eine Reihe von Tatsachen, welche man bisher unter dem Namen der Irradiation zusammengefaßt hat, und welche das Gemeinsame haben, daß stark beleuchtete Flächen größer erscheinen, als sie wirklich sind, während die benachbarten dunkeln Flächen um ebenso viel kleiner erscheinen.

Die Erscheinungen selbst sind nach der Form der betrachteten Figuren sehr mannigfaltig, sie sind im allgemeinen am leichtesten sichtbar und am stärksten, wenn die Akkommodation des Auges für den betrachteten Gegenstand nicht genau ist, einerlei ob derselbe zu fern oder zu nah ist, oder man das Auge mit einer Glaslinse, konkav oder konvex, bewaffnet, welche für die Entfernung des Gegenstandes nicht paßt. Aber die Irradiation fehlt auch nicht ganz, wenn die Akkommodation genau ist, und ist auch dann bei sehr hellen, namentlich kleinen Gegenständen deutlich zu bemerken, bei kleinen Gegen-

ständen offenbar deshalb, weil deren Größe durch die schmalen Zerstreuungskreise relativ mehr vergrößert wird, als die größerer Gegenstände, gegen deren Dimensionen die Breite so schmaler Zerstreuungskreise, wie sie das gut akkommodierte Auge liefert, verschwindet.

1. Helle Flächen erscheinen vergrößert. Die Größe von engen Löchern oder Spalten, durch welche helles Licht fällt, beurteilen wir niemals richtig, sie erscheinen uns immer breiter, als sie wirklich sind, auch bei schärfster Akkommodation. Ebenso erscheinen auch die Fixsterne als kleine helle Flächen, selbst wenn man sie durch ein Konkavglas betrachtet, welches genaue Akkommodation möglich macht. In einem Gitter aus feinen dunklen Stäben mit Zwischenräumen, welche genau ebenso breit sind wie die Stäbe (gewöhnliche Drahtgitter zu Interferenzversuchen), erscheinen vor einem hellen Hintergrunde die Zwischenräume stets breiter als die Stäbe. Kommt ungenaue Akkommodation hinzu, so sind die Erscheinungen viel auffallender und werden auch an größeren Objekten sichtbar. Fig. 32 zeigt ein weißes Quadrat auf schwarzem Grunde und ein schwarzes auf weißem Grunde. Bei starker Beleuchtung und

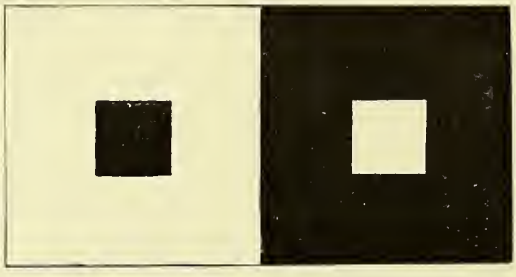


Fig. 32.

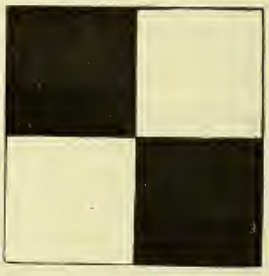


Fig. 33.

unzureichender Akkommodation wird das weiße größer erscheinen, obgleich beide genau gleich groß sind.

2. Nahe liegende helle Flächen fließen zusammen. Ein feiner Draht, welchen man zwischen das Auge und die Sonnenscheibe oder eine helle Flamme hält, verschwindet, indem die beiden hellen Flächen, die im Gesichtsfelde neben ihm liegen, von beiden Seiten her übergreifen und zusammenfließen. Bei Mustern, die aus schwarzen und weißen Quadraten ähnlich dem eines Schachbretts zusammengesetzt sind, wie Fig. 33, fließen durch die Irradiation die weißen Felder an den Ecken zusammen, und trennen die schwarzen. Plateau hat Felder von der Art wie Fig. 33 auch zur Messung der Breite der Irradiation benutzt. Aus einem dunkeln Schirme waren die weißen Felder ausgeschnitten und von hinten erleuchtet, von den beiden schwarzen Feldern war eines durch eine Schraube horizontal verschiebbar, und wurde so eingestellt, daß dem Beobachter die beiden mittleren vertikalen Grenzlinien in eine zusammenzufallen schienen. Für größere Entfernungen waren die schwarzen Felder aus Brettchen, für kleinere aus Stahlplättchen verfertigt. Der Fehler, welcher bei der Einstellung begangen war, bezeichnete die Breite der Irradiation.

3. Gerade Linien werden unterbrochen. Wenn man die Kante eines Lineals zwischen das Auge und eine helle Lichtflamme oder die Sonne hält, so erscheint das Lineal an der Stelle, wo der helle Körper darüber hervorblickt, einen Ausschnitt zu haben, wie Fig. 34 darstellt. Ich mache für

den letzteren Fall gleichzeichtig darauf aufmerksam, daß wenn der helle Körper eine Lampenflamme mit zylindrischem Dochte ist, der Einschnitt an den Rändern der Flamme, welche, wie oben erwähnt, eine größere absolute Helligkeit haben, tiefer erscheint als in der Mitte der Flamme, trotzdem das Auge die größere Helligkeit der Ränder nicht als solche empfindet.

Alle diese Erscheinungen reduzieren sich darauf, daß die Ränder heller Flächen im Gesichtsfelde sich gleichsam verschieben und über die benachbarten dunkleren Flächen übergreifen. Sie greifen desto mehr über, je ungenauer die Akkommodation ist, je größere Zerstreuungskreise also ein jeder lichte Punkt der Fläche im Auge entwirft. Nun wissen wir aber, daß auch bei genauster Akkommodation die Zerstreuungskreise nicht ganz fehlen wegen der Farbenzerstreuung und der übrigen Abweichungen des Auges, die wir in § 14 unter dem Namen der monochromatischen Abweichungen des Auges zusammengefaßt haben. Durch diese Zerstreuungskreise wird nun bewirkt, daß am Rande des Netzhautbildes einer hellen Fläche Licht sich weiter verbreitet, als das geometrische Bild der Fläche reicht, aber auch die Dunkelheit greift über den Rand des Bildes, d. h. das Licht fängt schon innerhalb des Randes, wo es noch seine volle Stärke haben sollte, an abzunehmen. Es sei in Fig. 35 $c$ ein Punkt des Randes einer hellen Fläche, $bg$ eine senkrecht gegen den Rand gezogene gerade Linie. Senkrecht gegen dieselbe seien Koordinaten aufgetragen, welche der objektiven Helligkeit in den entsprechenden Punkten von $bg$ proportional sind. Wäre das Bild der Fläche vollkommen genau, so würde die gebrochene Linie $adcg$ die Größe der Helligkeit ausdrücken. Von $b$ bis zum Rande der Fläche bei $c$ würde nämlich die Fläche die konstante Helligkeit $H$ haben, von $c$ ab nach $g$ zu die Helligkeit 0. Wenn durch Mangel der Akkommodation Zerstreuungskreise gebildet werden, so nimmt dagegen, wie oben S. 156 gezeigt ist, die Helligkeit ab wie die Kurve $afg$. Es greift dabei sowohl das Helle über das Dunkle über in $cg$, als das Dunkle über das Helle in $ad$, und so viel Licht sich über den Rand hinaus verbreitet, muß natürlich innerhalb des Randes der hellen Fläche entzogen werden. Solange wir nur die objektive Helligkeit berücksichtigen, würden also die hellen Flächen durch die Zerstreuungskreise nicht vergrößert erscheinen können. Im Gegenteil die Fläche, welche die volle Helligkeit zeigt, ist durch die Zerstreuungskreise kleiner geworden, wenn auch die Fläche, welche überhaupt Licht empfängt, größer geworden ist. Berücksichtigen wir nun aber, daß die Lichtempfindung für die höheren Stufen der objektiven Helligkeit gar nicht oder wenig verschieden ist, so folgt daraus, daß die Verminderung des Lichts innerhalb der Fläche weniger bemerkt werden wird, als die Erleuchtung vorher dunkler Stellen jenseits ihres Randes, so daß also für die Empfindung die Ausbreitung des Hellen allein, und nicht die des Dunkels vergrößert erscheinen muß. Am auffallendsten wird die Erscheinung sein, wenn die Fläche hell genug ist, daß innerhalb der Zer-

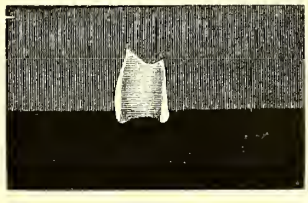


Fig. 34.

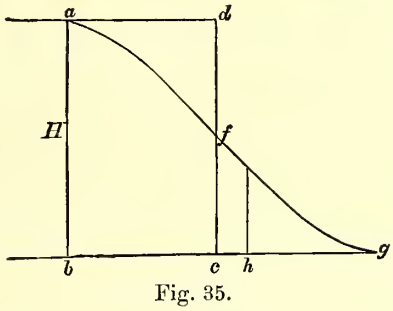



Fig. 35.

streuungskreise die Lichtempfindung schon ihr Maximum erreicht. Wäre das z. B. in Fig. 35 bei $h$ der Fall, so würde die scheinbare Helligkeit bei $h$ nicht mehr von der vollen Helligkeit im Innern der Fläche zu unterscheiden sein. Die volle Helligkeit der Fläche würde also bis $h$ zu reichen scheinen und auch jenseits $h$ erst sehr langsam abnehmen, ehe sie bei $g$ ganz verschwindet. Daraus erhellt auch, warum für das Zustandekommen der Irradiation große Helligkeit vorteilhaft ist. Desto näher nämlich an $g$ liegt die Stelle, wo das Maximum der Lichtempfindung erreicht wird. Daraus erklärt sich auch, warum bei gesteigerter Helligkeit des Grundes, selbst wenn die Empfindung dieser Helligkeit dabei nicht weiter steigen kann, doch die Irradiation noch wächst. Proportional der Ordinate $H$ wachsen nämlich bei gesteigerter objektiver Lichtstärke sämtliche Ordinaten der Kurve $ag$, und desto näher an $g$ rückt also auch die Ordinate, welche der für das Maximum der Empfindung genügenden Helligkeit entspricht. Messende Versuche über den Einfluß der Helligkeit hat Plateau ausgeführt, und dabei gefunden, daß die Größe der Irradiation nicht proportional der Helligkeit wächst, sondern in einem geringeren Maße, und bei steigender Helligkeit sich asymptotisch einem Maximum nähert, wie es auch aus unserer Erklärung folgt.

Es ergibt sich ferner aus dieser Theorie, warum die Irradiation desto breiter wird, je größere Zerstreuungskreise sich bilden.

Da bei den meisten Personen die Zerstreuungskreise eines zu fernen Punkts nach der Höhe größer sind, als nach der Breite, erscheinen helle Quadrate auf dunklem Grunde in einer für die Akkommodation etwas zu großen Entfernung perpendikulär verlängert, und schwarze Quadrate auf weißem Grunde horizontal verlängert. Die perpendikuläre Verlängerung weißer Quadrate sehen die meisten Personen auch bei genauer Akkommodation, weil sie, wie es scheint, dann für die Vertikallinien akkommodieren. Dagegen erscheinen weiße Rechtecke, deren horizontale Seite etwas länger ist als die vertikale, wie Quadrate. Nach den Versuchen von A. Fick[1] erschien einem geübten, nicht kurzsichtigen Auge bei 4500 mm Abstand ein Rechteck von 22 mm horizontaler und 20 mm vertikaler Seite als Quadrat, eines von 21 mm horizontaler und 20 mm vertikaler Seite als vertikal verlängertes Rechteck. In anderen Augen, denen ein ferner Lichtpunkt dreistrahlig erscheint, machen sich auch in den anderen Fällen von Irradiation drei Hauptrichtungen bemerklich, in denen sie am stärksten ist, wie es Joslin[2] beschreibt.

Ich habe in dem Vorstehenden den Namen der Irradiation nur auf diejenigen Fälle angewendet, wo man nicht die Zerstreuungskreise als solche wahrnimmt, sondern wo sich scheinbar die Fläche, welche die volle Beleuchtungsstärke hat, vergrößert. Indessen ist in neuester Zeit der Name der Irradiation auf die Bildung der Zerstreuungskreise überhaupt angewendet worden, auch wo man diese als lichtschwächere Teile des Bildes erkennt. Es ist aber wohl unnötig, auf diese Fälle einen besonderen neuen Namen anzuwenden. Es können übrigens auch durch die Zerstreuungskreise neue Begrenzungslinien entstehen, welche das Objekt in veränderter Größe erscheinen lassen, ohne daß die Lichtstärke noch einen besonderen Einfluß hätte. Namentlich hat Volkmann[3] gefunden, daß

[1] Henle und Pfeuffer, Zeitschrift für rationelle Medizin. Neue Folge. II. S. 83.
[2] Poggendorffs Ann. LI. Ergänzbd. S. 107.
[3] Berichte der sächsischen Ges. d. Wiss. 1857. S. 129—148.

sehr feine schwarze Fäden auf weißem Grunde ebenso wie weiße auf dunklem Grunde für breiter gehalten werden, als sie sind, während die bisher betrachtete Art der Irradiation immer nur das Hellere vergrößert. Volkmann benutzte Fäden von 0,0445 mm Dicke in 333 mm Entfernung vom Auge, welche demgemäß dem Auge viel kleiner erscheinen mußten, als die kleinsten wahrnehmbaren Distanzen. Er hatte ein Schraubenmikrometer so einrichten lassen, daß die Fäden langsam einander genähert werden konnten, und stellte dem Experimentierenden die Aufgabe, die Fäden so zu stellen, daß der Zwischenraum ebenso breit sei, wie die Fäden. Alle Individuen machten aber den Zwischenraum zu breit, und zwar auch, wenn er hell war, und die Fäden dunkel. Volkmann gibt davon die Erklärung, daß man statt der schmalen schwarzen Streifen breitere graue Zerstreuungsbilder derselben sehe, denen man dann den mittleren hellen Zwischenraum gleich mache. Er benutzt deshalb auch diese Messungen, um die Breite der Zerstreuungsbildchen bei guter Akkommodation zu bestimmen. Er selbst machte den Zwischenraum im Mittel gleich 0,207 mm, während die Dicke der Fäden, denen derselbe gleich sein sollte, nur 0,0445 mm betrug, und berechnet daraus die Breite des Zerstreuungsbildes auf der Netzhaut gleich 0,0035 mm, bei anderen Personen bei hellem Hintergrund schwankt diese letztere Größe zwischen 0,0006 und 0,0025. Diese Größen sind kleiner als die kleinsten sichtbaren Abstände (0,0044 mm) und als die Zapfen des gelben Flecks (0,0045 bis 0,0054), so daß möglicherweise die letzteren die Breite des schwarzen Bildes bestimmt haben können. Daß so große Unterschiede in den Einstellungen vorkamen, darf bei einer so subtilen Aufgabe wohl nicht wundern.

Aber auch schwarze Streifen von erkennbarer Breite, welche bei so ungenügender Akkommodation betrachtet werden, daß die Zerstreuungskreise viel breiter sind, als die Streifen, erscheinen breiter als sie sind. Dies scheint mir auf der Verteilung des Lichts in dem Zerstreuungskreise zu beruhen. Es sei Fig. 36 $ab$ der Durchschnitt eines Papierblatts, auf welches eine schwarze Linie gezeichnet ist, die hier im Querschnitt als Punkt $c$ erscheint. Es mögen durch mangelhafte Akkommodation Zerstreuungskreise vom Radius $fc$ entstehen, so wird die Kurve der Lichtstärke, in der die einzelnen Punkte der Linie $ab$ im Netzhautbilde erscheinen, nach den in § 13 entwickelten Prinzipien und abgesehen von den Störungen durch Asymmetrie der Linse ausgedrückt durch die Linie $\alpha\varphi\gamma\delta\beta$. Hier erleidet nun die Lichtstärke bei $\varphi$ und $\delta$ einen plötzlichen Abfall, und diese Stellen erscheinen deshalb als Grenzlinien. Wäre die Linie $c$ weiß auf schwarzem Grunde, so würde $\alpha\beta$ als Abszissenlinie zu nehmen sein, und die negativen Ordinaten der Kurve $\varphi\gamma\delta$ würden die Lichtstärke ausdrücken; auch dann haben wir bei $f$ und $d$ einen plötzlichen Abfall der Lichtstärke. Davon übrigens, daß solche Linien, in denen der Differentialquotient der Lichtstärke unendlich groß wird, als Grenzlinien erscheinen, kann man sich mittels der rotierenden Scheibe überzeugen. Wenn man eine weiße Scheibe mit einem runden kreisförmigen Flecke, wie Fig. 37, rotieren läßt, so erscheint der schwarze Fleck bei schneller Bewegung wie ein grauer Kreis, dessen Lichtintensität durch eine ganz ähnliche Kurve wie $\alpha\varphi\gamma\delta\beta$ Fig. 36 auszudrücken

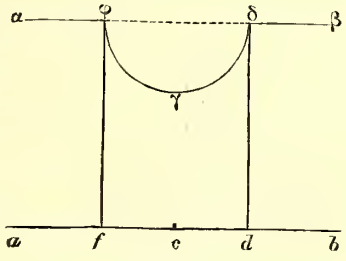


Fig. 36.

sein würde, wie aus den im folgenden Paragraphen zu entwickelnden Gesetzen hervorgeht. Der graue Kreis erscheint dabei ganz scharf begrenzt an beiden Seiten, und in seinem Innern bemerkt man kaum die ungleichen Grade der Helligkeit; der Streifen erscheint vielmehr fast gleichmäßig grau gefärbt. Übrigens mischen sich in die Zerstreuungsbilder schmaler schwarzer Streifen meist mehr oder weniger die Doppelbilder ein, welche durch Asymmetrie der Linse entstehen (Fig. 73. Bd. I, S. 163), wobei die Lichtverteilung im Zerstreuungsbilde zwar verändert wird, aber doch jedenfalls die größere Breite des Bildes bestehen bleibt.

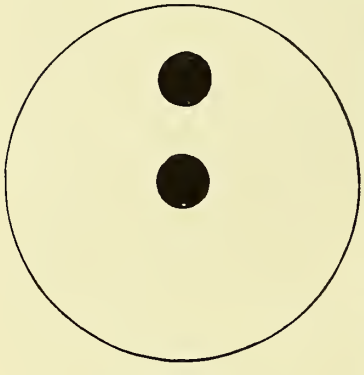


Fig. 37.

Sobald der schwarze Streifen nicht mehr sehr schmal ist gegen die Breite der Zerstreuungsbilder, so nimmt auch die Helligkeit an seinem Rande allmählich ab, wie in Fig. 35, und dann erscheinen seine Ränder verwaschen grau, seine Mitte schwarz. Man erkennt alsdann das Vorhandensein von Zerstreuungskreisen und die Täuschung schwindet. Der Unterschied zeigt sich sehr auffallend in einem von Volkmann angegebenen Versuche. Man betrachte die Fig. 38 aus solcher Entfernung, daß die Akkommodation beträchtlich mangelhaft ist, so wird man finden, daß der mittlere weiße Streifen, der überall gleiche Breite hat, eine keulenförmige Gestalt bekommt, indem das zwischen den breiten schwarzen Flächen stehende Ende breit wird, das zwischen den schmalen schwarzen Streifen stehende dagegen schmaler wird und gleichsam den Griff der Keule bildet. Zwischen den breiten schwarzen Flächen breitet sich der weiße Streifen durch die gewöhnliche Art der Irradiation aus. Die schmalen schwarzen Streifen dagegen verwandeln sich in breitere graue, und beeinträchtigen dadurch die Breite des zwischen ihnen liegenden mittleren Weiß. Plateau hat ähnliche Phänomene beschrieben, daraus aber geschlossen, daß die Irradiation zweier benachbarter weißer Ränder sich gegenseitig beschränke.

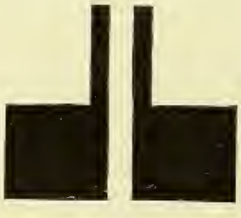


Fig. 38.

Diese zuletzt beschriebenen Phänomene der Ausbreitung dunkler Streifen sind deshalb einfache Fälle von Zerstreuungsbildern, unabhängig von der Beleuchtungsstärke und von dem Gesetze der Empfindungsstärke Ich würde deshalb vorziehen den Namen der Irradiation nicht auf sie anzuwenden, sondern diesen zu beschränken auf diejenigen Fälle, wo die Erscheinung von der Beleuchtungsstärke abhängt.

Eine sehr große Anzahl von Physikern und Physiologen hat eine andere Erklärung der Irradiationserscheinungen angenommen, welche namentlich von Plateau verteidigt und ausführlich durchgeführt ist. Danach wird angenommen, daß in der Netzhaut eine erregte Nervenfaser die Fähigkeit habe, den Zustand der Reizung auch in den benachbarten Fasern hervorzurufen, so daß auch diese Lichtempfindung veranlassen, obgleich sie von keinem objektiven Lichte getroffen werden. Es würde dies ein Fall sogenannter Mitempfindung sein. Dergleichen Mitempfindungen kommen bei anderen sensiblen Nerven vor. Viele Personen empfinden z. B. Kitzel in der Nase, wenn heftiges Licht in ihr Auge fällt, empfinden ein kaltes Überlaufen in der Haut des Rumpfes, wenn sie

kreischende oder quietschende Töne hören. In diesen und anderen Fällen kann die Übertragung der Reizung von der primär erregten Nervenfaser auf die andere erst innerhalb der Zentralorgane geschehen, da der Sehnerv mit den sensiblen Nerven der Nase (*Nervus trigeminus*) und der Hörnerv mit den Hautnerven des Rumpfes keine andere anatomische Kommunikation hat, als durch die Zentralorgane. Übrigens kommen dergleichen Mitempfindungen immer nur in ziemlich vereinzelten Beispielen vor, und die angeführte Deutung derselben kann nicht als fest begründet angesehen werden, weil möglicherweise auch reflektorische Entladungen nach den absondernden Drüsen der Nase oder den Gefäßmuskeln der Hautgefäße ähnliche Empfindungen mittelbar hervorrufen könnten. Daß in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle die Erregung einer sensiblen Faser nicht auf andere Fasern übertragen wird, geht schon aus der allgemeinen Erfahrung hervor, wonach wir die einzelnen Eindrücke, welche auf unsere Sinnesorgane geschehen, eben isoliert empfinden können. Wird eine Hautstelle gestochen, dadurch die zugehörige Nervenfaser erregt, so würden ausgebreitete Schmerzempfindungen in vielen Stellen der Haut entstehen müssen, wenn die Überleitung auf andere Nervenfasern regelmäßig und konstant vorkäme. Wir würden dann die primär erregte Stelle von den sekundär erregten nicht unterscheiden können. In der Regel empfinden wir nun Reizung einer einzelnen Hautstelle eben nur in der gereizten Stelle, und sonst nirgends; es treten also keine Mitempfindungen ein. Wenn aber der örtliche Schmerz sehr heftig ist und sehr lange dauert, so treten allerdings auch Schmerzen in den benachbarten Teilen ein, welche gewöhnlich als Mitempfindungen gedeutet werden, aber freilich auch von der Ausbreitung der schmerzerregenden Schädlichkeit oder der Entzündung herrühren können. Plateau erinnert auch an die Tatsache, daß, wenn das Bild eines auf weißes Papier gezeichneten schwarzen Flecks auf die Eintrittsstelle des Sehnerven fällt, in der entsprechenden Stelle des Gesichtsfeldes nur Weiß empfunden wird, und nimmt auch hier eine Ausbreitung der Erregung über die Eintrittsstelle des Sehnerven an. Daß aber diese Erscheinung ganz anderer Art ist, werden wir später zeigen. Wenn man also die Irradiation im Auge als Mitempfindung auffassen will, so würde diese Ansicht sich doch nur auf selbst noch zweifelhafte Analogien in andern Teilen des Nervensystems stützen müssen. Andererseits sind die Erscheinungen der Irradiation im Auge alle der Art, daß immer auch objektives Licht auf die Teile der Netzhaut fällt oder fallen kann, wo man die Mitempfindung vermutet. Die Stärke der Irradiation ist durchaus der Größe der Zerstreuungskreise proportional und die ganze Erscheinung läßt sich mit allen ihren Einzelheiten aus anderen wohl festgestellten Erklärungsprinzipien herleiten, so daß ich es für ungerechtfertigt halte, in einem solchen Falle neue, und in sich nicht sicher gestellte Prinzipien der Erklärung zu Hilfe zu nehmen.

Wir müssen hier noch Rechenschaft geben über die Methoden der Photometrie*, soweit dabei die physiologischen Eigenschaften des Auges in Betracht kommen. Wir sehen dabei ab von allen Methoden, wobei die Vergleichung der Helligkeiten nicht durch das Auge, sondern durch die photochemischen Wirkungen, oder die absorbierte Wärme geschieht. Dabei ist zu bemerken, daß das Auge sehr wohl gebraucht werden kann, um zwei Lichtmengen von gleicher Qualität, z. B. zwei Mengen weißen Lichts, oder zwei Mengen von derselben einfachen Farbe untereinander zu vergleichen. Denn wenn zwei Lichtmengen gleicher Qualität das Auge unter gleichen Umständen

* Vergl. hierzu Zusatz II am Ende dieses Bandes. N.

gleich stark affizieren, dürfen wir schließen, daß auch ihre objektive Intensität gleich groß sei. Für solche Fälle dürfen wir das Auge als ein bequemes und empfindliches Reagens anwenden, und können uns unabhängig machen von den besonderen Eigenschaften dieses Reagens, so daß wir objektiv gültige Resultate erhalten. Dieser Teil der Photometrie gehört also eigentlich nicht in die physiologische Optik hinein, nach der Bd. I, S. 35 von uns aufgestellten Begrenzung dieser Wissenschaft. Wir wollen ihn hier eben auch nur so weit besprechen, als die physiologischen Eigentümlichkeiten des Auges von Einfluß sind auf die Empfindlichkeit der photometrischen Messungen.

Dagegen ist streng festzuhalten, was aus den oben angeführten Tatsachen klar genug hervorgeht, daß jede Vergleichung verschiedenfarbigen Lichts durch das Auge nur einen physiologischen Wert hat, und nichts aussagt über die objektive Stärke des verglichenen Lichts, so daß dergleichen photometrische Messungen durchaus innerhalb des Gebietes der physiologischen Optik bleiben.

Im allgemeinen ist das Verfahren in der Photometrie folgendes. Wenn das Verhältnis zweier Helligkeiten $A$ und $B$ bestimmt werden soll, schwächt man die Intensität der helleren, welche $B$ sein mag, mittels irgend einer Methode die zu bestimmen erlaubt, in welchem Verhältnisse $B$ geschwächt worden ist, bis $B$ ebenso hell erscheint als $A$. Es sei durch die Schwächung die Helligkeit $B$ geworden $n\,B$, wo $n$ ein echter Bruch von bekannter Größe sein muß, so ist

$$A = n\,B$$

und dadurch das Verhältnis von $A$ zu $B$ bestimmt. Die verschiedenen photometrischen Methoden unterscheiden sich zunächst dadurch voneinander, daß sie verschiedene Mittel anwenden, um das hellere Licht in einem bekannten Verhältnisse zu schwächen; die zu wählende Methode wird in dieser Beziehung immer hauptsächlich von der Natur der Aufgabe abhängen müssen. Sie unterscheiden sich dann aber auch durch die Art und Weise, wie dem Auge des Beobachters die beiden Helligkeiten zur Vergleichung dargeboten werden, und in dieser Beziehung ist zu bemerken, daß das Auge die Helligkeiten zweier Flächen am feinsten unterscheidet, wenn die beiden Flächen unmittelbar aneinander stoßen, und ihre Grenzlinie durch nichts weiter bezeichnet ist, als durch den Unterschied ihrer Helligkeit. Auch scheint die Empfindlichkeit noch zu wachsen, wenn die beiden Flächen nicht durch eine einfache gerade Linie getrennt sind, sondern die eine in der anderen eine kompliziertere Zeichnung (Ringe, Buchstaben usw.) bildet mit mehrfachen Abwechselungen von Hell und Dunkel. Endlich müssen die zu vergleichenden Flächen auch eine gewisse, nicht zu kleine räumliche Ausdehnung haben. Sehr viel unvorteilhafter sind natürlich diejenigen Methoden, bei denen eine Lichtstärke dadurch gemessen wird, daß man ihren Eindruck auf das Auge durch irgend ein Mittel so abschwächt, bis er verschwindet. Denn offenbar sind die Grenzen der Empfindlichkeit des Auges nicht so bestimmt und so konstant, um darauf Messungen begründen zu können. Unter verschiedenen Umständen (Stärke der Beleuchtung, Bewegung usw.) erkennt dasselbe Auge bald eine Differenz von $\frac{1}{60}$, bald von $\frac{1}{120}$ der Lichtstärke. Machen wir die Empfindlichkeit des Auges also zum Maßstab, so würden wir in zwei solchen Fällen Lichtmengen als gleich setzen, von denen die eine doppelt so groß ist als die andere, oder vielleicht noch mehr.

Bouguer[1] ließ zwei weiße Flächen durch die zu vergleichenden Lichter beleuchten, stellte sich so, daß er sie beide perspektivisch nebeneinander sah, und veränderte dann die Entfernung der einen weißen Fläche vom Licht so lange, bis die Erleuchtung gleich wurde. Lambert, der in seinem berühmten Werke Photometria[2]

[1] *Essai d'Optique 1729 in 12 mo. — Traitè d'Optique sur la gradation de la lumière.* Paris 1760. Latein. Übersetzung Wien 1762.

[2] Photometria sive de mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae. Augustae Vindelicorum 1760.

das erste vollständige System der theoretischen Photometrie mit bewundernswertem Scharfsinn und Erfindungskraft hinstellte, wendete neben verschiedenen anderen Methoden, die einzelnen Zwecken angepaßt waren, namentlich das Verfahren an, durch zwei Lichter eine weiße Fläche erleuchten zu lassen, einen undurchsichtigen Stab davor zu bringen, der zwei Schatten wirft, und dann die Entfernung des einen Lichts so lange zu verändern, bis die beiden Schatten gleich hell sind. Dasselbe Verfahren wendete auch Rumford[1] an, und wurde der dazu nötige Apparat unter dem Namen des Rumfordschen Photometers bekannt. Um die Stellung des Beobachters bequemer zu machen, wendete Potter[2] statt der zwei weißen undurchsichtigen Flächen zwei transparente an, und Ritchie[3] fügte noch zwei unter 45° geneigte Spiegel hinzu, welche das Licht auf die weißen Flächen warfen, und erlaubten die Lichtquellen nach entgegengesetzten Richtungen hin aufzustellen. J. Herschel[4] hob hervor, daß die Bedingung inniger Berührung der zu vergleichenden Flächen in Ritchies Photometer erfüllt sei, und dadurch die Genauigkeit zunehme. Übrigens leidet die Anwendung des Gesetzes, daß die Erleuchtung dem Quadrate der Entfernung umgekehrt proportional sei, in diesen Fällen an zwei Störungsursachen. Erstens nämlich muß bei der Anwendung dieses Gesetzes die Ausdehnung der Lichtquelle als unendlich klein gegen ihre Entfernung von der beleuchteten Fläche vorausgesetzt werden, und das ist nicht der Fall, wenn man große Lichtintensitäten braucht, und das Licht sehr nähern muß. Zweitens dürfen, namentlich bei weit entferntem Lichte im Hintergrunde des Zimmers keine merklich erleuchteten Gegenstände sich finden, und diese Bedingung wird bei Versuchen im Zimmer immer schwer zu erfüllen sein. Pernot[5] modifizierte das Verfahren von Potter dadurch, daß er die beiden transparent beleuchteten Flächen noch von der entgegengesetzten Seite durch ein drittes Licht beleuchtet, welches er allmählich näher bringt. Sind jene beiden gleich, so müssen sie gleichzeitig verschwinden. In Bunsens Photometer wird eine Papierfläche, die zum Teil mit Stearin getränkt ist, von vorn und von hinten beleuchtet. Ist das hintere Licht schwach, so erscheint der transparente Fleck dunkel, ist es zu stark, hell.

Die Absorption der Lichtstrahlen zur Schwächung benutzte de Maistre[6], der ein Prisma von blauem Glase mit einem gleichen von weißem Glase so zusammenlegte, daß die äußeren Begrenzungsflächen parallel wurden, und das Licht ungebrochen durchging, aber an verschiedenen Stellen des Doppelprismas verschieden stark absorbiert wurde. Ähnlich benutzte Quetelet[7] zwei Prismen aus blauem Glase, die verschieden gegeneinander verschoben eine planparallele Platte von veränderlicher Dicke bildeten. Durch die hierbei angewendeten blauen Glasplatten wird aber die Farbe des hindurchgehenden Lichts verändert, und daß bei der Vergleichung verschiedenfarbigen Lichts keine genaue Messung möglich sei, ist schon erwähnt worden. Noch mißlicher sind zwei andere Instrumente, bei welchen nicht zwei verschiedene Lichter verglichen, sondern absolute Lichtstärken dadurch bestimmt werden sollen, daß sie bei bestimmter Größe der Absorption ganz verschwinden. Das eine ist von Lampadius[8] vorgeschlagen. Er sieht durch eine Anzahl dünner Hornblätter nach dem hellen Gegenstande und vermehrt sie so lange, bis das Objekt eben verschwindet. de Limencey und Secretan[9] brauchten statt der Hornblätter Papierscheiben. Das andere ist das von einem Ungenannten[10] vorgeschlagene Lamprotometer, um die

[1] *Philos. Transact.* LXXXIV. p. 67.
[2] *Edinb. Journal of Science.* New Ser. III. 284.
[3] *Annals of Philosophy.* Ser. III. Vol. I. 174.
[4] *On light.* p. 29.
[5] Dinglers polyt. Journ. CXIX. 155. *Moniteur industr.* 1850. Nr. 1509.
[6] *Bibl. univ. de Genève.* LI. 323. Poggendorffs Ann XXIX. 187.
[7] *Bibl. univ. de Genève.* LII. 212. *Poggendorffs Ann. XXIX. 187—189.
[8] Gehlers Wörterbuch. 2. Auflage. VII. 482.
[9] *Cosmos.* VIII. 174. Polyt. Zentralblatt 1856. 570; Dinglers polyt. Journ. CXLI. 73.
[10] Poggendorffs Ann. XXIX. 490.

Helligkeit des Tages zu messen. Es wird dabei bestimmt, wie starke Lackmustinktur man nehmen müsse, damit ein vom Tageslicht beleuchteter Platindraht durch ein mit der Tinktur gefülltes Glas gesehen verschwinde. Die Grenze der Empfindlichkeit des Auges für Licht ist doch zu unbestimmt, als daß bei solchen Messungen nicht Irrungen um das Dreifache oder mehr der gemessenen Größe eintreten sollten. Auf demselben Prinzip beruht ein Photometer von Albert[1] und eines von Pitter[2].

Dagegen waren es zwei andere Wege, auf denen allmählich die vollendeteren Methoden, welche jetzt üblich sind, sich entwickelten. Der eine dieser Wege hat Bestimmung der Helligkeit der Sterne zum Ziel. J. Herschel schwächte das Licht des helleren Sterns, indem er die Apertur des Fernrohrs, welches auf ihn gerichtet war, durch ein vorgesetztes Diaphragma verkleinerte. Dasselbe Prinzip liegt auch A. v. Humboldts Astrometer zugrunde. Dies ist ein Spiegelsextant von gewöhnlicher Einrichtung. Das Fernrohr des Instruments ist bekanntlich auf einen halb belegten, halb unbelegten Spiegel gerichtet und sieht den einen Stern durch den unbelegten Teil, den anderen durch den belegten und einen zweiten Spiegel. Indem man das Fernrohr senkrecht gegen die Trennungslinie des belegten und unbelegten Teils verschiebt, kann man mehr Strahlen von dem einen oder anderen bekommen, und so die Bilder zweier Sterne, oder die beiden Bilder eines Sterns nach Belieben gleich oder ungleich machen, und ihre Lichtstärke vergleichen. Das Verfahren von Humboldt hat den Vorteil, daß die beiden Sterne, welche verglichen werden sollen, dicht nebeneinander im Gesichtsfelde desselben Fernrohrs erscheinen. Die Vergleichung so intensiver kleiner Lichtpunkte ist aber schwerer, als die Vergleichung heller Flächen. Diesem Mangel wird durch das Objektiv-Photometer von Steinheil[3] abgeholfen. Es ist dies ein Teleskop, dessen Objektivglas halbiert ist. Vor jeder Hälfte des Objektivs befindet sich ein rechtwinkliges Glasprisma als Spiegel. Das Ganze wird so gestellt, daß die eine Hälfte des Objektivs dem Beobachter den einen, die andere den anderen der zu vergleichenden Sterne zeigt. Dann werden die beiden Hälften des Objektivs einzeln hinausgeschoben, so daß nicht mehr deutliche Bilder, sondern Zerstreuungsbilder der beiden Sterne entstehen, welche desto lichtschwächer werden, je größer man sie macht, d. h. je weiter man die entsprechende Hälfte des Objektivs hinausschiebt. Jede solche Hälfte ist mit einem rechteckigen Diaphragma versehen, welches mit anderen von anderer Größe vertauscht werden kann. Die beiden Bilder der Sterne erscheinen nach richtiger Einstellung als zwei dicht aneinander grenzende nahe gleich große Rechtecke von gleicher Helligkeit, also unter den günstigsten Bedingungen, um kleine Unterschiede der Helligkeit zu erkennen. Durch dieses Instrument sind zuerst genaue Lichtmessungen an Fixsternen und Planeten möglich geworden. Schwerd[4] dagegen benutzte die Diffraktion, welche durch enge kreisförmige Diaphragmen entsteht, um helle Flächen hervorzubringen.

Für die physikalischen Untersuchungen dagegen, wobei es sich darum handelt zu bestimmen, wieviel Licht bei Refraktionen, Reflexionen und anderen Vorgängen verloren gegangen ist, hat man mit Vorteil das stärkere Licht durch Brechung und Zurückwerfung an unbelegten Glastafeln geschwächt. Brewster[5] und Quetelet[6] brauchten mehrfache nahe senkrechte Reflexionen, um starkes Licht mit schwachem vergleichbar zu machen; 28 bis 29 solche Reflexionen verlöschen z. B. das Sonnenlicht. Duwe[7] benutzte ebenso die Reflexionen an schwarzen Glastafeln, wie sie zu Polarisationsapparaten gebraucht werden. Die verschieden starke Reflexion bei

[1] Dinglers polyt. Journ. C. 20 und CI. 342.

[2] *Mechanics Magazine.* XLVI. 291.

[3] Poggendorffs Ann. XXXIV. 646. — Denkschriften der Münchener Akad. Math.-phys. Klasse. Bd. II. 1836. — Ähnlich die Methode von Johnson. *Cosmos.* III. 301—305.

[4] Bericht über die Naturforscherversammlung 1858.

[5] *Edinburgh Transactions.* 1815.

[6] *Bibl. univ. de Genève.* LII. 212. Poggendorffs Ann. XXIX. 187—189.

[7] Poggendorffs Ann. XXIX. 190 Anm.

wechselndem Einfallswinkel benutzte Potter[1]. Lichtquelle ist ihm ein halbzylindrisch geformter weißer Schirm, dessen gleichmäßige Beleuchtung man voraussetzen muß, die aber schwer zu erreichen sein wird. Die geschickteste Ausführung hat dies Prinzip in dem Photometer von Arago erhalten, und ist dadurch zur Ausführung sehr genauer Messungen der Lichtstärke brauchbar geworden[2]. Die Lichtquelle dieses Photometers ist ein transparenter, ebener, senkrecht stehender Papierschirm, der am Fenster steht, und in allen seinen Teilen gleichmäßig erleuchtet sein muß, was sich übrigens durch das Instrument selbst kontrollieren läßt. Senkrecht gegen den Schirm und gegen den Horizont ist ferner aufgestellt eine planparallele Glasplatte, unter deren Mitte sich ein Zapfen befindet, um welchen als Achse ein Rohr in einer horizontalen Ebene drehbar ist. Das Rohr ist horizontal gegen die Mitte der Platte gerichtet, und der Beobachter, welcher durch das Rohr sieht, erblickt teils durch die Platte einen Teil des Papierschirms, teils in ihr gespiegelt einen anderen Teil dieses Schirms. Rechts und links von der Glasplatte zwischen ihr und dem Schirm sind horizontal und in etwas verschiedener Höhe schwarze Stäbe angebracht, die dicht nebeneinander teils durch die Platte, teils von ihr gespiegelt gesehen werden. Wo der gespiegelte schwarze Stab erscheint, sieht der Beobachter das durchgelassene Licht des weißen Schirms allein; wo der schwarze Stab im durchgelassenen Licht erscheint, sieht der Beobachter das gespiegelte Licht des weißen Schirms. Die Röhre wird nun so gestellt, daß die beiden schwarzen Streifen gleich hell erscheinen, und der Winkel, unter dem die Röhre gegen die Glasplatte gerichtet ist, wird durch eine passend angebrachte Teilung gemessen. Man kann nun das einfallende oder das gespiegelte Licht allerlei anderen Einwirkungen unterwerfen, und wird dann im allgemeinen einen anderen Winkel erhalten, unter dem gesehen die beiden Bilder gleich hell erscheinen. Um aus diesem Winkel die stattfindende Schwächung des Lichts berechnen zu können, muß vorher empirisch bestimmt sein, wie sich bei den verschiedenen Einfallswinkeln die durchgelassenen zu den gespiegelten Lichtmengen verhalten, wofür Arago ein besonderes Verfahren vorgeschlagen hat, welches darauf beruht, daß die beiden Strahlenbündel, welche ein doppeltbrechender Kristall gibt. gleich stark und jeder einzelne halb so stark sind, als der ungetrennte Strahl. Indem er so eines der beiden Strahlenbündel durch Doppelbrechung halbiert oder vierteilt, kann er die Stellungen ermitteln, wo das durchgelassene Licht das Viertel, die Hälfte, das Doppelte, das Vierfache des zurückgeworfenen ist und schließlich durch Interpolation die betreffenden Verhältnisse auch für alle zwischenliegenden Winkel bestimmen.

Arago hatte noch ein anderes Prinzip zur Schwächung des Lichts vorgeschlagen, nämlich die Polarisation in doppeltbrechenden Kristallen zu benutzen. Läßt man vollständig polarisiertes Licht von der Intensität $I$ in einen solchen Kristall eintreten, und bildet die Polarisationsebene des Lichts mit dem entsprechenden Hauptschnitte des Kristalls einen Winkel $\varphi$, so erhält man durch die doppelte Brechung zwei Bündel, deren Intensität beziehlich $I\cos^2\varphi$ und $I\sin^2\varphi$ ist. Kann man den Winkel $\varphi$ messen, so ist dadurch also auch unmittelbar das Verhältnis der Lichtstärke der gebrochenen Bündel gegeben. Die Nicolschen Prismen eliminieren das eine Bündel ganz und lassen nur das andere bestehen. Hierauf beruht das Photometer von F. Bernard[3]. Die beiden zu vergleichenden Strahlen werden parallel zueinander, jeder durch zwei drehbare Nicolsche Prismen geleitet, und dann durch totale Reflexion in einem rechtwinkligen Glasprisma parallel und dicht nebeneinander in das Auge des Beobachters gelenkt, der ihre Intensität gleich zu machen sucht dadurch, daß er die Hauptschnitte

[1] *Edinburgh Journal of Science.* New Ser. IV. 50 und 320. — Poggendorffs Ann. XXIX. 487.

[2] *Oeuvres* de Fr. Arago X. p. 184—221.

[3] *Annales de Chemie.* (3) XXXV. 385—438. *Cosmos.* II. 496—497 und 636—639. *C. R.* XXXVI. 728—731.

der beiden Nicolschen Prismen, durch welche der stärkere Strahl geht, unter einem passenden Winkel gegeneinander stellt. Stammt das zu vergleichende Licht aus derselben Lichtquelle her, so kann man die beiden ersten Nicolschen Prismen weglassen, und an ihrer Stelle ein doppeltbrechendes Prisma gebrauchen, welches das Licht der Quelle in zwei gleiche verschieden polarisierte Hälften spaltet. Sehr ähnlich im Prinzip ist das Photometer von Beer[1]. Die beiden Strahlenbündel kommen horizontal von rechts und links zum Instrumente, gehen jeder durch ein Nicolsches Prisma, werden durch einen stählernen Doppelspiegel, der zwei unter $45^0$ gegen den Horizont geneigte spiegelnde Flächen hat, vertikal gemacht, und fallen durch einen dritten Nicol in das Auge des Beobachters. Dieser sieht vor sich ein kreisförmiges Feld, dessen rechte und linke Hälfte den beiden reflektierenden Flächen des Doppelspiegels entsprechen, und kann durch Drehung der Nicols die beiden Felder gleich hell machen. Ähnlich ist auch das Photometer von Zöllner[2].

Babinet[3] hat zur Vergleichung der Lichtstärke zweier Strahlenbündel polarisierten Lichts ein Mittel benutzt, welches die Vergleichung ihrer Stärke ungemein erleichtert. Sein Photometer ist zunächst bestimmt, die Helligkeit von Gasflammen zu vergleichen. Eine Röhre läuft in zwei Schenkel aus, von denen der eine die Verlängerung der Röhre bildet, während der andere mit dieser einen Winkel von $70^0$ einschließt. Beide sind durch mattgeschliffene Glastafeln geschlossen. Am Scheitel des Winkels wird die Röhre von einem Satz Glasplatten durchsetzt, welcher den Winkel halbiert. Werden nun vor die beiden Röhrenenden Lichtquellen gesetzt, so tritt das Licht der einen Quelle in das gemeinsame Röhrenstück, nachdem es von dem Glassatz durchgelassen und senkrecht gegen die Einfallsebene polarisiert ist, und das Licht der anderen Quelle, nachdem es reflektiert, und in der Einfallsebene polarisiert ist. Das gemeinsame Röhrenstück ist durch ein Soleilsches Polariskop geschlossen. Solange die beiden senkrecht gegeneinander polarisierten Lichtmengen ungleiche Intensität haben, sieht man vier komplementär gefärbte Halbkreise. Die Farben verschwinden, wenn man beide Lichtmengen dadurch gleich macht, daß man die Entfernung der Flammen verändert. In diesem Instrumente ist also die Vergleichung der Lichtstärke für das Auge zurückgeführt auf die Vergleichung der Farben benachbarter Flächen.

Im Prinzip ähnlich ist das auf einer Idee von Neumann beruhende Photometer von Wild[4], aber durch die Abänderung des physiologischen Teils des Apparats scheint in diesem Instrumente der höchste Grad von Empfindlichkeit erreicht zu sein. Die beiden zu vergleichenden Strahlen fallen parallel miteinander auf das Instrument und werden schließlich zur Deckung gebracht, indem der eine unter dem Polarisationswinkel erst von einer Glasplatte $A$ und dann von einem ihr parallelen Satze von Glasplatten $B$ reflektiert und vollständig polarisiert wird, während der andere Strahl durch den Glassatz $B$ hindurchgeht. Ehe dieser zweite Strahl jedoch unter dem Polarisationswinkel auf den Glassatz $B$ trifft, ist er schon durch einen eben solchen Glassatz $C$ hindurchgegangen. Der Glassatz $C$ ist um eine Achse drehbar, so daß der Strahl ihn unter verschiedenen genau meßbaren Winkeln passieren kann, wodurch die Menge des durchgelassenen Lichts und das Verhältnis seiner Polarisation geändert wird. Übrigens ist der Glassatz $C$ so gestellt, daß die Polarisation, die der Strahl in ihm erhält, entgegengesetzt ist derjenigen, welche ihm der Glassatz $B$ mitteilen würde. Lassen wir den zweiten Strahl senkrecht durch $C$ gehen, so fällt er unpolarisiert auf $B$, und wird hier entgegengesetzt dem ersten reflektierten Strahle polarisiert, mit dem er übrigens von da ab auf demselben Wege vereinigt weiter geht. Wird $C$ mehr und mehr geneigt, so nimmt die Menge polarisierten Lichts im zweiten Strahle mehr und mehr ab, und zwar in einem Verhältnisse, welches man

[1] Poggendorffs Ann. LXXXVI. 78—88.
[2] Photometrische Untersuchungen. Dissertat. Basel 1859.
[3] *C. R.* XXXVII. 774.
[4] Poggendorffs Ann. XCIX. 235.

nach Messung des Einfallswinkels berechnen kann. Mit dem vollständig polarisierten ersten Strahle wird also eine variable Menge teils entgegengesetzt polarisierten, teils natürlichen Lichts des zweiten Strahls gemischt. Dieses gemischte Licht geht nun schließlich durch eine senkrecht zur Achse geschnittene Kalkspatplatte und einen Turmalin. Ist die Menge polarisierten Lichts in beiden Strahlen gleich groß, so sieht der Beobachter nichts von dem Kreuz mit Ringen in der Kalkspatplatte, wohl aber wird dieses Kreuz sichtbar, sobald die Mengen polarisierten Lichts in beiden Strahlen nicht gleich groß sind. Die Empfindlichkeit des Auges im Erkennen der Polarisationsfigur des Kri talls zeigte sich außerordentlich groß, so daß bei wiederholten Einstellungen das Verhältnis der Intensitäten sich nur um $^1/_{200}$ verschieden fand. Eine noch größere Genauigkeit hat Wild[1] in seinem neueren Photometer erreicht, wo er statt der polarisierten Glasplatten doppeltbrechende Kristalle und als Polariskop zwei gekreuzte Bergkristallplatten benutzte, welche unter $45^0$ gegen die Achse geschnitten sind. Durch Linsen sind die Strahlen, die hindurchgehen, parallel gemacht. Dergleichen Platten zeigen ein geradliniges Fransensystem, von dem bei passender Einstellung des Apparats nur ein Querstreifen ausgelöscht wird, während zu beiden Seiten die Farben komplementär sind. Der Beobachter kann sehr genau auf die Mitte der ausgelöschten Fransen das Fadenkreuz einstellen. Nach Wilds Angaben beträgt der Fehler bei einmaliger Einstellung nur zwischen 0,001 und 0,002 der Lichtstärke.

Talbot[2] hat zur Schwächung des Lichts eine rotierende Scheibe mit schwarzen und durchsichtigen Sektoren angewendet, und dieses Mittel ist auch von Babinet und Secchi[3] zu Messungen der Sternhelligkeiten angewendet worden.

Von Pouillet[4] ist zur Erleichterung des physiologischen Teils der photometrischen Methoden vorgeschlagen worden, Lichtbilder zu gebrauchen, die nach Daguerres Verfahren auf polierten Silberplatten ausgeführt sind. Um ein solches Bild positiv zu sehen, muß es von der Seite beleuchtet sein, der Beobachter aber muß so stehen, daß er irgend einen dunklen Körper, aber nicht das einfallende Licht von der Platte gespiegelt erblickt. Erblickt er im Gegenteil einen sehr hellen Körper von der Platte gespiegelt, so erscheint das Bild negativ, was hell sein sollte, dunkel, und umgekehrt. Dazwischen aber gibt es eine gewisse Helligkeit der gespiegelten Fläche, bei welcher das Bild ganz verschwindet, während es bei der geringsten Vermehrung oder Verminderung der Helligkeit positiv oder negativ auftaucht.

Ein von den bisherigen ganz abweichendes physiologisches Prinzip der Photometrie hat Schafhäutl[5] benutzt, für dessen Richtigkeit er aber bisher den Beweis noch schuldig geblieben ist. Er behauptet, das Zeitintervall, welches zwischen zwei gleichartigen Lichteindrücken verfließen kann, ohne daß das Auge die Unterbrechung bemerkt, sei proportional der Wurzel aus der Intensität des Lichts. Sein Apparat besteht aus einer Stahlfeder, die an ihrem unteren Ende so eingeklemmt ist, daß sie in ihrer Gleichgewichtslage vertikal steht. An ihrem oberen Ende trägt sie einen rechtwinkligen Schirm von dünnem geschwärzten Kupferblech, der in der Mitte von einer rechteckigen Öffnung durchbrochen ist. Durch eine horizontale von zwei Dioptern geschlossene Röhre sieht der Beobachter auf den Schirm, welchen die Feder trägt; dahinter ist die Lichtquelle so aufgestellt, daß ihr Licht nur dann in das

[1] Mitt. der bernischen naturf. Ges. 1859. Nr. 427—429.

[2] Poggendorffs Ann. XXXV. 457. 464. *Phil. Mag.* Nov. 1834. p. 327. Darüber Plateau in *Bullet. de l'Acad. de Bruxelles.* 1835. p. 52.

[3] *Arch. d. sc. phys. de Genève.* XX. 121—122. *Memorie dell' osservatorio di Roma. Cosmos.* I. 43.

[4] *C. R.* XXXV. 373—379. Poggendorffs Ann. LXXXVII. 490—498. *Inst.* 1852. p. 301. *Cosmos.* I. 546—549.

[5] Abbildung und Beschreibung des Universal-Vibrations-Photometer. Münchner Abhandl. VII. 465—497.

Auge des Beobachters dringen kann, wenn der Schlitz des Schirms in der Achse der Diopterröhre sich befindet. Die Feder wird so lange verkürzt, bis das Bild der Lichtquelle nicht mehr zitternd, sondern ruhig erscheint. Die Lichtintensitäten sollen den Quadraten der Schwingungszeiten (umgekehrt?) proportional sein, oder den vierten Potenzen der Federlängen. Selbst wenn wir die erstere Proportionalität zugeben wollten, würde die letztere bei einer schwingenden belasteten Feder nicht zutreffen.

Endlich ist hier noch die Methode zu erwähnen, welche Fraunhofer[1] gebraucht hat, um die Lichtstärke der verschiedenen Farben des Spektrums von Glasprismen untereinander zu vergleichen. Das Spektrum wurde wie gewöhnlich durch ein Fernrohr beobachtet, vor dessen Objekt $A$ (Fig. 39) ein Prisma $P$ gesetzt ist. $B$ ist die Okularlinse. Innerhalb der Okularröhre ist, $45^0$ gegen die Achse des Fernrohrs geneigt, ein kleiner Stahlspiegel $s$ befestigt, dessen eine scharfe Kante in der Brennebene des Okulars liegt und die Fernrohrachse schneidet. In der vom Spiegel nicht bedeckten Hälfte der Okularblendung erscheint ein Teil des prismatischen Spektrums. Der Spiegel dagegen reflektiert das Licht einer kleinen Ölflamme $L$, welche in einem seitlich der Okularröhre angesetzten, oben und unten aufgeschlitzten Rohre verschiebbar ist. Vor dieser Flamme ist eine kleine Blendung $b$ angebracht, durch die die sichtbare leuchtende Fläche begrenzt ist. Dem Beobachter erscheint dieses Licht nur in einem breiten Zerstreuungskreise, dessen Helligkeit dem Quadrate der Entfernung $sb$ umgekehrt proportional ist. Man verschiebt nun die Lampe so lange, bis die Helligkeit der beiden in der Okularblendung erscheinenden Halbkreise gleich ist, d. h. bis die Grenze beider am undeutlichsten erscheint. Die Versuche von Fraunhofer haben sehr wenig übereinstimmende Zahlen gegeben für die Helligkeit der verschiedenen Teile des Spektrums, wahrscheinlich hauptsächlich deshalb, weil ihm der Einfluß der absoluten Intensität auf die relative Helligkeit der Farben unbekannt war.

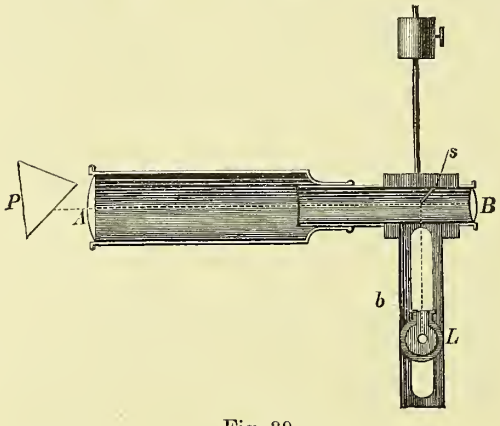


Fig. 39.

Die ersten Messungen über die Empfindlichkeit des Auges für Lichtunterschiede hat Bouguer ausgeführt, und dabei gefunden, daß die wahrnehmbare Differenz ein nahehin konstanter Bruchteil der ganzen Intensität sei. Dasselbe Gesetz wurde später von Steinheil, Masson, Arago, Volkmann bei photometrischen Messungen wiedergefunden, und von Fechner ausführlich behandelt.

Die Beobachtungen über die verschiedene relative Helligkeit der Farben sind zum Teil von Purkinje, später vollständiger von Dove, an Spektralfarben von Helmholtz ausgeführt.

Unter den Gegenständen dieses Paragraphen sind über die Irradiation die meisten Untersuchungen und Streitigkeiten geführt worden. Die Tatsache, daß helle Gegenstände unter Umständen vergrößert erscheinen, drängte sich natürlich schon früh der Beobachtung auf. Plateau zitiert Epikurs Brief an Pythokles, in dem erwähnt wird, daß eine Flamme bei Tage in der Ferne kleiner aussehe als bei Nacht, und daß deshalb auch wohl die Sterne zu groß erscheinen könnten; dann den Anfang der dritten Satire des Persius. — *Jam clarum mane fenestras Intrat et angustas extendit lumine rimas.*

Später waren es besonders die Astronomen, welche die Erscheinungen der Irradiation untersuchten, weil sie sich bei ihren Beobachtungen über die Größe der

[1] Gilberts Ann. 1817. Bd. 56. S. 297.

Himmelskörper störend bemerklich machte. Keppler[1] schob sie hauptsächlich auf mangelnde Akkommodation und hat damit allerdings das Wesentliche der meisten dazu gehörigen Erscheinungen getroffen. Ebenso studierte sie Galilei[2] genauer; er spricht es aus, daß sie desto lebhafter ist, je größer der Unterschied des hellen Objekts und des dunklen Grundes, daß helle Objekte stets vergrößert werden, dagegen dunkle Objekte auf hellem Grunde (Merkur und Venus vor der Sonne) verkleinert werden, daß die Vergrößerung sehr kleiner Objekte am bedeutendsten ist. Anfangs glaubte er, wie Gassendi[3], annehmen zu dürfen, daß leuchtende Gegenstände die umgebende Luft entzündeten, später aber suchte er den Grund richtiger in unregelmäßigen Brechungen im Auge. Auch Gassendi glaubte später, daß die Sterne bei Nacht größer erschienen, weil die Pupille weiter sei. Für sein Auge schwankte der Durchmesser des Mondes, je nach der Helligkeit des Grundes, zwischen 33′ und und 38′. Die Verkleinerung kleiner Gegenstände auf hellem Grunde erörterte namentlich Schickard[4], der zugleich die Behauptung aufstellte, daß das Licht am Rande dunkler Objekte sich zum Teil in den Schattenraum hinein ausbreite, wie denn auch später le Gentil[5] die Irradiation durch Diffraktion zu erklären suchte. Dagegen suchte Horrockes[6] in Galileis Sinne zu verteidigen, daß die Irradiation ihren Sitz im Auge habe. Descartes meinte, daß beim Anblick heller Gegenstände die Pupille sich verengere, das Auge einem nahe sehenden ähnlich werde, und dadurch die Beurteilung der Entfernung und Größe solcher Objekte verändert werde, außerdem aber könne die Bewegung der Netzhautelemente, wenn sie sehr heftig werde, auf die benachbarten übertragen werden, so daß das empfundene Bild größer erscheine. Hierdurch ist Descartes der Urheber der auf Übertragung der Nervenerregung gegründeten Theorie der Irradiation geworden. Als nun später die Astronomen stark vergrößernde und gut gearbeitete Fernrohre zu gebrauchen anfingen, machte sich die Irradiation bei den größeren Gestirnen kaum noch merklich, und man fing an sie zu bezweifeln und zu läugnen[7], während andere Astronomen ihre Existenz anerkannten[8]. Bei den astronomischen Beobachtungen vermischen sich in der Regel die Wirkungen der chromatischen und sphärischen Aberration des Fernrohrs mit denen der Unvollkommenheiten des Auges, und es mußte hier notwendig das Urteil der Astronomen, welche Fernrohre gebrauchten, verschieden ausfallen, je nach der Beschaffenheit des Fernrohrs. Daß bei den besten Fernrohren die Irradiation sich in den Messungen nicht mehr merklich macht, hat namentlich Bessel 1832 beim Durchgang des Merkur vor der Sonne gezeigt.

Während die Astronomen meistens nur die Frage verhandelten, ob Irradiation bestehe oder nicht, die Frage über ihre Ursachen dagegen übergingen, fingen andere Naturforscher auch an, letztere Frage zu behandeln. J. Müller[9] betrachtete anfangs die Irradiation, wie wir es oben getan haben, als eine Ausbreitung objektiven Lichts, später wurde er selbst, so wie die meisten anderen Physiologen jener Zeit, in welcher

---

[1] Paralipomena. p. 217. 220. 285.

[2] *Opere di Galilei.* T. II. p. 18; 255—257, 396; 467—469. Systema cosmicum. Lyon 1641. Dial. III. p. 248.

[3] Opera omnia Florenz 1727. T. III. p. 385. 567. 583—585. T. I. p. 499—508.

[4] Pars responsi ad epistolas P. Gassendi de Mercurio sub sole viso. Tubingae 1632.

[5] *Mem. de l'Acad. d. Sc. de Paris.* 1784. p. 469. (Gelesen 1743.)

[6] Venus in sole visa. Cap. XVI. Abgedruckt hinter Hevelius Mercurius in sole visus.

[7] Biot, *Traité élémentaire d'astronomie physique edit.* 2me. p. 534. 536. — Delambre, *Astronomie théorique et pratique.* T. II. chap. 29. § 12. — Bessel, Astronom. Nachrichten 1832. Nr. 228.

[8] Hassenfratz, *Cours de physique céleste.* 1810. p. 23. — J. Herschel, *On light.* T. I. § 697. — Quetelet, *Positions de Physique.* 1829. T. III. p. 81. — Brandes in Gehlers physikal. Wörterbuch. Neu bearbeitet. V. 796. Robison, *Mém. of the Roy. Astron. Soc. of London.* V. p. 1.

[9] Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinnes. 1826. S. 400.

sich auch die Lehre von den Mitempfindungen entwickelte, durch die sehr ausführliche Arbeit von Plateau[4] über die Irradiation bewogen, sie von einer Übertragung der Reizung von einem Netzhautelement auf das andere abzuleiten. Die Erscheinungen, welche Plateau als Irradiation beschreibt, sind von der Art, wie sie ein schwach kurzsichtiges Auge an entfernteren Gegenständen sehen muß, es sind also meist Erscheinungen unvollkommener Akkommodation. Diese Deutung weist er aber zurück, weil er auch die geringe Irradiation, welche sehr helle Gegenstände in der Entfernung des deutlichen Sehens zeigen, beobachtet hatte, und die übrigen Ursachen der Lichtzerstreuung im Auge, welche in diesem Falle wirksam werden, noch nicht kannte. Er stützt sich ferner darauf, daß nach seinen Versuchen die Irradiation bei verschieden entfernten Objekten immer dieselbe Winkelgröße behalte; doch beziehen sich seine Messungen nur auf Entfernungen von mehr als 0,6 m, also auf Distanzen, innerhalb deren sich der Akkommodationsfehler nicht mehr merklich änderte. Auffallend ist, daß ihn seine Versuche mit Linsen, die die richtige Sehweite herstellten, und damit die Irradiation aufhoben, nicht auf die richtige Erklärung geleitet haben. Ebenso möchte es schwer sein, seinen Satz, daß zwei benachbarte Irradiationen sich gegenseitig schwächen, mit irgend einer Voraussetzung, wie Mitempfindungen erregt werden mögen, zu vereinigen. Denn wenn die Netzhautteile, welche im Bilde des schwarzen Streifens liegen, von beiden Seiten her in Erregung versetzt werden, muß ihre Erregung notwendig stärker werden, als wenn nur an einer Seite ein helles Feld anstößt. Plateau muß die genannte Behauptung aufstellen, um zu erklären, daß ein feiner schwarzer Strich auf einem hellen Felde überhaupt noch gesehen wird, wenn der Strich schmaler ist als die Breite der Irradiationssäume; während sich alles einfach erklärt, wenn man annimmt, die Irradiation rühre von Zerstreuungsbildern her.

Eine Kritik der Arbeit von Plateau hat Fechner und später ausführlicher H. Welcker[5] gegeben und die Erklärung von Keppler wiederhergestellt, welche in der Tat bei weitem die meisten Fälle der Irradiation umfaßt. Hinzuzusetzen wäre der Welckerschen Arbeit eben nur noch, daß sehr kleine und sehr helle Gegenstände auch in der Entfernung des deutlichsten Sehens Irradiation zeigen, wegen der übrigen Arten der Abweichung der Strahlen im Auge. An Welcker schlossen sich andere an, welche die verschiedenen Arten der Lichtzerstreuung im Auge für die Erklärung der Irradiation gebrauchten, namentlich lenkten Fliedner[1] und H. Meyer[2] (Leipzig), Cramer die Aufmerksamkeit auf die monochromatischen Abweichungen des Auges, Fick auf die chromatische. Es fehlte aber den bisher gegebenen objektiven Erklärungen der Irradiation immer noch der Grund, warum nur die Erhöhung der Helligkeit auf dem dunklen Grunde, und nicht zugleich die Schwächung am Rande der hellen Fläche wahrgenommen wird. Diesen meint der Verfasser in der obigen Darstellung nachgewiesen zu haben.

---

Messung der Empfindlichkeit.

1760. Bouguer, *Traité d'Optique sur la gradation de la lumière, publ. par Lacaille.* Paris 81.
1837. Steinheil, Abhandl. der math.-phys. Klasse der bayr. Akademie 1837. S. 14.
1845. Masson, *Ann. de chim. et de phys.* XIV. 150.
1858. Arago, *Oeuvres complètes.* X. 255.

---

[4] *Mém. de l'Acad. de Bruxelles.* T. XI. Poggendorffs Ann. Ergänzungsband. I. S. 79, 193. 405.

[5] Über die Irradiation und einige andere Erscheinungen des Sehens. Gießen 1852.

[1] Poggendorffs Ann. LXXXV. 348.

[2] Poggendorffs Ann. LXXXIX. 540.

1858. *G. Th. Fechner, Über ein wichtiges psychophysisches Gesetz. Leipzig. Aus den Abhandl. der sächs. Gesellschaft der Wissenschaft. Math.-phys. Klasse IV. 457. — Nachtrag dazu im Berichte der sächsischen Gesellschaft 1859. S. 58.

Vergleichung der Helligkeit verschiedener Farben.

1814. J. Fraunhofer in Denkschr. der bayr. Akad. V. 211.
1825. Purkinje, Zur Physiologie der Sinne. II. 109.
1852. *Dove. Über den Einfluß der Helligkeit einer weißen Beleuchtung auf die relative Intensität verschiedener Farben. Berl. Monatsber. 1852. S. 69—78. Poggendorffs Ann. LXXXV. 397—408. *Inst.* 1852. p. 193. *Phil. Mag.* (4) IV. 246—249. *Arch. d. se. phys.* XXI. 215—219. *Cosmos.* I. 208—211.
Pouillet, *C. R.* XXXV. 373—379. Poggendorffs Ann. LXXXVII. 490—498. *Inst.* 1852. p. 301. *Cosmos.* I. 546—549.
1855. H. Helmholtz in Poggendorffs Ann. XCIV. 18—21.

Irradiation.

1604. Keppler ad Vitellionem Paralipomena. Frankfurt 1604. p. 217.
1619. Galilei, *Discorso delle comete di Mario Guiducci.* Opere II. 256, ferner Op. II. 18, 396, 467—469. Systema cosmicum. Lyon 1641. Dial. III. p. 248.
1632. Schickard, Pars responsi ad epistolas P. Gassendi de Mercurio sub sole viso. Tubingae 1632. (Der Planet wird durch Irradiation verkleinert.)
1637. Descartes, *Dioptrique.* Leyde 1637. *Discours.* VI. p. 67 und 68.
1642. Gassendi, Epistola III de proportione, qua gravia decidentia accelerantur. Opera omnia. III. 585.
1738. Jurin. *On distinct and indistinct vision.* § 53, in Smiths *Opties.*
1743. Le Gentil, *Mém. de l'Acad. des se. Paris.* 1784. p. 469.
1810. Hassenfratz, *Cours de physique céleste.* 1810. p. 23.
1811. Biot, *Traité élémentaire d'astronomie physique* édit. 2me. p. 534, 536.
1814. Delambre, *Astronomie théorique et pratique.* T. II. Chap. 26. § 197. T. III. Chap. 29. § 12.
1826. J. Müller, Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinns. S. 400.
1828. Brandes in Gehlers neuem physik. Wörterbuch. V. 796.
J. Herschel, *On light.* I. § 697.
1829. Quetelet, *Positions de physique.* III. 81.
1832. Bessel in Astronom. Nachrichten 1832. Nr. 228.
1838. *Plateau, *Mémoire sur l'irradiation Nouv. Mém. de. l'Acad. de Bruxelles.* T. XI. Poggendorffs Ann. Ergänzungsbd. I. S. 79, 193, 405.
1840. Fechner, Von der sogenannten Irradiation. Poggendorffs Ann. L. 195.
1849. Baden Powell *sur l'irradiation. Inst.* 1849. Nr. 818. p. 288. *Memoirs of the London astron. Society.* XVIII. p. 69. *Inst.* Nr. 840. p. 47. *Report of British Assoc.* 1849. 2. p. 21.
1850. Haidinger, Das Interferenzschachbrettmuster. Wiener Ber. VII. 389. Poggendorffs Ann. LXXXV. 350. *Cosmos.* I. 252, 454. (Fall von Irradiation, vermischt mit monochromatischen Abweichungen.)
1851. Dove, Über die Ursache des Glanzes und der Irradiation. Poggendorffs Ann. LXXXVIII. 169. Berl. Monatsber. 1851. p. 252. *Phil. Mag.* (4) IV. 241. *Arch d. se. phys. et nat.* XXI. 209. *Inst.* Nr. 991. p. 421.
1852. *H. Welcker, Über Irradiation und einige andere Erscheinungen des Sehens. Gießen 1852.
Fliedner, Beobachtungen über Zerstreuungsbilder im Auge, sowie über die Theorie des Sehens. Poggendorffs Ann. LXXXV. 348.
Trouessart, *Note concernant ses recherches sur la théorie de la vision. C. R.* XXXV. 134—136. *Arch. d. se. phys.* XX. 305—306.
L. L. Vallée, *Mémoire* XIII. *De la vision considérée dans les influences en quelque sorte moléculaires, exercées dans les réfractions, et du phenomène de l'irradiation. C. R.* XXXV. 679—681.
1853. H. Meyer, Über die sphärische Abweichung des menschlichen Auges. Poggendorffs Ann. LXXXIX. 540—568. Fechner, Zentralblatt 1853. p. 864.

1854. F. Burckhardt, Zur Irradiation. Verh. der naturforsch. Gesellschaft zu Basel. I. 154—157.
1854. J. J. Oppel, Über den Einfluß der Beleuchtung auf die relative Lichtstärke verschiedener Farben. Jahresber. des Frankf. Vereins, 1853—54. S. 44—49.
1855. A. Cramer, Beitrag zur Erklärung der sogenannten Irradiationserscheinungen. Prager Vierteljahrssehrift 1855. IV. 50—70.
1856. A. Fick, Einige Versuche über die chromatische Aberration des menschlichen Auges. Archiv für Ophthalmol. II. 2. p. 70—76.
1857. A. W. Volkmann, Über Irradiation. Bericht der sächs. Gesellschaft 1857. p. 129.
1858. A. C. Twining, *The relation of illumination to magnifying power, when visibility is maintained.*
1861. H. Aubert, Beiträge zur Physiologie der Netzhaut. Abhd. der schlesischen Gesellsch. 1861. S. 49—103.
Volkmann, Über den Einfluß der Extension eines Lichtreizes auf dessen Erkennbarkeit. Göttinger Nachrichten. 1861. S. 170—176.
Derselbe, Über die Irradiation, welche auch bei vollständiger Akkommodation des Auges statt hat. Münchener Ber. 1861. (2) 75—78.
1862. Aubert, Über subjektive Lichtersehcinungen. Poggendorffs Ann. CXVII 638—641.
1863. v. Wittich, Über die geringsten Ausdehnungen, welche man farbigen Objekten geben kann, um sie noch in ihrer spezifischen Farbe wahrzunehmen. Königsberger Mediz. Jahrbücher. IV, S. 23—55.
Volkmann, Physiologische Untersuchungen im Gebiete der Optik. Heft 1. Leipzig 1863.
1864. G. Th. Fechner, Über die Frage des psychophysisehen Grundgesetzes mit Rücksicht auf Auberts Versuche. Leipziger Ber. 1864.
Aubert, Physiologie der Netzhaut. Breslau. S. 23—153.

## § 22. Die Dauer der Lichtempfindung.*

Wenn ein Muskelnerv durch einen kurzdauernden elektrischen Schlag erregt wird, so vergeht eine kurze Zeit (etwa $^1/_{60}$ Sek.), ehe die Wirkung der Reizung durch Kontraktion des Muskels sichtbar wird, und es vergeht eine viel längere Zeit (etwa $^1/_6$ Sek.), ehe die Wirkung der Reizung auf den Muskel wieder verschwindet. Die Veränderung, welche durch die Reizung in den organischen Teilen eintritt, verläuft also viel langsamer, als die elektrische Entladung, welche die Reizung bewirkte. Dasselbe findet im Auge statt. Wir können allerdings bis jetzt noch nicht nachweisen, daß die Empfindung später entsteht, als das Licht einzuwirken anfängt, aber wohl, daß sie noch andauert, wenn das Licht schon aufgehört hat einzuwirken.

Die Dauer der Nachwirkung ist desto größer, je stärker das einwirkende Licht gewesen ist, und je weniger ermüdet das Auge. Wenn man einen Augenblick nach der Sonne oder in eine helle Lichtflamme geblickt hat, und dann plötzlich die Augen schließt und mit der Hand bedeckt, oder in einen absolut dunklen Hintergrund blickt, so sieht man noch kurze Zeit auf dem dunklen Grunde eine helle Erscheinung von der Gestalt des vorher gesehenen hellen Körpers, welche allmählich erblaßt und dabei auch ihre Farbe verändert. Die Nachbilder sehr heller Objekte sind am leichtesten zu sehen, weil sie am längsten dauern. Übrigens kann man auch von weniger hellen Objekten solche Nachbilder, wie sie hier beschrieben sind, erhalten, wenn nur das Auge vorher im Dunkeln gehörig ausgeruht ist, und man dann für einen Augenblick das Objekt betrachtet. Ein solches Nachbild eines hellen Körpers auf dunklem

* Vergl. hierzu Zusatz I. B. 6. N.

Grunde hat im ersten Augenblicke die Farbe des Objekts, und zeigt oft sehr genau noch die einzelnen Teile des Objekts in richtiger Gestalt und Schattierung. Dreht man z. B. in einem übrigens unbeleuchteten Zimmer eine Lampe aus, indem man im letzten Augenblicke noch nach der Flamme hinblickt, so sieht man nachher noch im Dunkeln das helle Bild der Flamme umgeben von dem etwas schwächeren der Glocke usw. Ändert man die Richtung des Auges, so bewegt sich das Nachbild in gleichem Sinne, so daß es immer diejenige Stelle des Gesichtsfeldes einnimmt, welche der ursprünglich vom Lichte getroffenen Stelle der Netzhaut entspricht. Damit das Nachbild recht scharf gezeichnet sei, ist es nötig, vom Objekt einen einzigen Punkt scharf zu fixieren. Wenn das Auge gewankt hat, ist das Nachbild verwaschen, oder man sieht auch wohl zwei oder drei Bilder des Objekts sich teilweise deckend. Ist das Bild recht scharf gezeichnet, so kann man unter günstigen Umständen an diesem Nachbilde Einzelheiten bemerken, auf die man während der Betrachtung des Objekts selbst die Aufmerksamkeit nicht gewendet, und die man deshalb übersehen hatte.

Dergleichen Nachbilder heller Objekte, in denen die hellen Teile des Objekts hell, die dunkeln dunkel erscheinen, und die deshalb positive Nachbilder genannt werden, vermischen sich übrigens gewöhnlich, während sie allmählich verschwinden, mit anderen Bildern, in denen das Helle des Objekts dunkel, das Dunkle hell erscheint, mit negativen Nachbildern, welche hauptsächlich dadurch hervorgerufen zu sein scheinen, daß die Empfänglichkeit der Netzhaut für Licht ebenfalls durch die vorausgegangene Lichtwirkung verändert worden ist. Es lassen sich diese beide Arten von Erscheinungen in der Beschreibung nicht streng voneinander trennen. Ich werde deshalb die genauere Schilderung der positiven Nachbilder erst im nächsten Paragraphen mit der der negativen zusammen geben, und in diesem Paragraphen mich darauf beschränken die Wirkungen schnell wiederholter Lichteindrücke zu beschreiben, bei denen die Nachdauer des Lichteindrucks rein zur Erscheinung kommt, ohne wesentlich durch die veränderte Reizempfindlichkeit des Auges gestört zu werden.

Die Haupttatsache dieses Gebietes ist die, daß hinreichend schnell wiederholte Lichteindrücke ähnlicher Art dieselbe Wirkung auf das Auge ausüben wie eine kontinuierliche Beleuchtung. Die Wiederholung des Eindrucks muß zu dem Ende nur so schnell geschehen, daß die Nachwirkung eines jeden Eindrucks noch nicht merklich nachgelassen hat, wenn der nächste eintritt.

Am leichtesten zeigen dies die rotierenden Scheiben. Wenn sich auf einer schwarzen Scheibe ein heller weißer Punkt befindet, und die Scheibe rotiert schnell genug, so erscheint an Stelle des rotierenden Punktes ein grauer Kreis, der in allen seinen Punkten ganz gleichmäßig aussieht, und an welchem nichts mehr von Bewegung zu entdecken ist. Indem das Auge nämlich irgend eine Stelle des scheinbar ruhenden Kreises fixiert, werden die Stellen der Netzhaut, auf welchen der Kreis sich abbildet, in schneller Wiederholung von dem Bilde des weißen Punktes getroffen, der sich in dem Kreise bewegt. Sie empfangen also einen Lichteindruck, der wegen der Schnelligkeit der Wiederholung kontinuierlich erscheint, und natürlich nicht so stark ist, als wenn fortdauernd weißes Licht auf die Netzhaut fiele, daher nicht weiß, sondern grau erscheint. Bewegt sich dagegen das Auge selbst, so daß sein Fixationspunkt sich in derselben Richtung fortbewegt, wie der helle Punkt, so kann letzterer sichtbar und

die scheinbare Kontinuität des grauen Kreises dadurch unterbrochen werden. Es ist leicht ersichtlich, daß wenn der Fixationspunkt des Auges sich eine Zeitlang genau ebenso schnell und in derselben Richtung fortbewegte, wie der helle Punkt und immer auf diesen geheftet bliebe, sich das Bild des hellen Punktes dauernd auf dem gelben Flecke der Netzhaut befinden würde, und auf die übrigen Stellen des Augengrundes nur das Bild der dunklen Scheibe fallen würde. Unter diesen Umständen erkennt das Auge die Anwesenheit eines weißen Flecks an Stelle des grauen Kreises; ebenso wenn die Bewegungen des Fixationspunktes und des hellen Flecks zwar nicht ganz kongruent sind, aber die relative Bewegung beider gegeneinander verhältnismäßig gering ist.[1]

Befindet sich auf der Scheibe noch ein zweiter heller Punkt in derselben Entfernung vom Mittelpunkte wie der erste, so wird auch der zweite scheinbar zu einem hellen Kreise ausgebreitet, welcher mit dem hellen Kreise des ersten Punktes zusammenfällt. Die Eindrücke beider Punkte auf der Retina addieren sich. Ebenso wenn eine größere Zahl heller Punkte auf demselben Kreise stehen. Wenn man sich daher auf einer solchen rotierenden Scheibe Kreislinien gezogen denkt, deren Mittelpunkt in der Rotationsachse der Scheibe liegt, so geben bei der Rotation alle Punkte einer solchen Kreislinie einzeln genommen das Bild einer gleichmäßig beleuchteten Kreislinie, und alle diese kreisförmigen Bilder der einzelnen Punkte fallen auf dieselben Teile der Netzhaut und vereinigen sich hier zu einem Gesamtbilde. Für diese Erscheinung kann man nun folgendes Gesetz aufstellen: Jede Kreislinie der Scheibe, deren Mittelpunkt in der Rotationsachse liegt, erscheint so, als ob alles Licht, welches sämtliche Punkte der Kreislinie von sich geben, gleichmäßig über die ganze Länge der Kreislinie verbreitet sei, und zwar scheint dieses Gesetz ebensogut für einfarbiges wie für vielfarbiges Licht zu gelten. Beziehen wir dieses Gesetz auf die Tätigkeit der Netzhaut selbst, so können wir es so aussprechen: Wenn eine Stelle der Netzhaut von periodisch veränderlichem und regelmäßig in derselben Weise wiederkehrendem Lichte getroffen wird, und die Dauer der Periode hinreichend kurz ist, so entsteht ein kontinuierlicher Eindruck, der dem gleich ist, welcher entstehen würde, wenn das während einer jeden Periode eintreffende Licht gleichmäßig über die ganze Dauer der Periode verteilt würde.

Um die Richtigkeit dieses Gesetzes zu prüfen, konstruiere man sich solche Scheiben, wie Fig. 40. Der innerste Ring zeigt die halbe Peripherie Weiß, die andere Hälfte Schwarz; im mittleren Ringe sind zwei Viertel, d. h. wieder die halbe Peripherie weiß, im äußeren ebenso vier Achtel, der Rest schwarz. Läßt man eine solche Scheibe rotieren, so erscheint sie in ihrer ganzen Ausdehnung ganz gleichmäßig grau gefärbt. Nur muß man darauf achten, daß die Scheibe schnell genug rotiert, um auch im innersten Ringe einen vollkommen kontinuierlichen Eindruck zu geben. Ebenso kann man auch das Weiß über andere beliebig lange Bogenstücke der Peripherie verteilen; vorausgesetzt nur, daß in allen Ringen der Scheibe die Summe der Winkel, welche das Weiß einnimmt, gleich groß ist, so geben alle immer dasselbe Grau. Statt des Schwarz und Weiß kann man auch verschiedene Farben nehmen, und erhält

[1] Siehe Dove in Poggendorffs Ann. LXXI. 112. Stevelly in Sillim. J. (2) X. 401. — Montigny. *Bull. de Bruxelles.* XVIII. 2. p. 4. Institut 1847. Nr. 928. p. 332.

in allen Ringen dieselbe Mischfarbe, wenn die Summe der Winkel, welche jede der beiden Farben in den verschiedenen Ringen einnimmt, gleich groß ist.

Auf diese Weise kann man leicht eine große Menge von Prüfungen des Gesetzes ausführen, aber freilich immer nur intermittierendes Licht mit intermittierendem vergleichen, und zwar nur unter Umständen, wo die Qualität der beiden Eindrücke, welche abwechseln, in den verschiedenen verglichenen Fällen dieselbe ist.

Um nun die Richtigkeit des Gesetzes auch für solche Fälle zu verifizieren, wo intermittierendes Licht mit kontinuierlichem verglichen werden soll, habe ich die in Fig. 40 abgebildete Scheibe angewendet, auf welcher Weiß und Schwarz gleich große Winkel einnehmen. Bei der Rotation erscheint ein Grau von der halben Helligkeit des Weiß. Nun kann man andererseits ein solches Grau hervorbringen, wenn man auf eine schwarze Tafel einen weißen Streifen legt, und diesen durch ein doppeltbrechendes Prismas ansieht. Dann erscheinen zwei Bilder des Streifens, jedes aber von der halben Helligkeit. Eine größere graue Fläche dieser Art erhält man, wenn man abwechselnd gleich breite weiße und schwarze Streifen auf der Tafel anbringt, und sich mit dem doppeltbrechenden Prisma in eine solche Entfernung stellt, daß die Doppelbilder der weißen Streifen sich genau mit denen der schwarzen decken; dann erscheint die ganze Fläche grau mit der halben Helligkeit der weißen Streifen. Dieses Grau ist nun genau dasselbe, welches durch Umdrehung der Scheibe Fig. 40 entsteht. Natürlich muß man bei der Vergleichung zu letzterer dasselbe Schwarz und Weiß nehmen, aus dem man die parallelen Streifen gemacht hat, muß beide Flächen genau gleich beleuchten, und auch die rotierende Scheibe durch das doppeltbrechende Prisma betrachten, aber so, daß sich ihre beiden Bilder nicht trennen, damit auch das Licht der Scheibe der Reflexion und Absorption im Prisma eben unterworfen wird, wie das der weißen Streifen. Plateau erwies dasselbe Gesetz auf folgendem Wege. Er brachte eine rotierende Scheibe mit weißen und schwarzen Sektoren und eine ganz weiße in verschiedene Entfernung von einem Lichte, bis ihre Helligkeit gleich groß erschien. Ist die Zahl der weißen Sektoren $n$, und die Breite jedes einzelnen in Winkelgraden gleich $w$, so ist die Breite aller zusammengenommen gleich $nw$. Hat nun das Weiß in der Entfernung 1 von der Lichtquelle die Helligkeit $H$, und denken wir das Licht, welches es aussendet, über die ganze Scheibe gleichmäßig verbreitet, so wird die Helligkeit geschwächt in dem Verhältnisse, welches die Fläche der ganzen Scheibe zu der der weißen Sektoren hat. Die Helligkeit wird also $\frac{nw}{360} H$.

Fig. 40.

Wenn nun die rotierende Scheibe in der Entfernung $r$ von der Lichtquelle gleich hell ist mit einer ganz weißen Scheibe in der Entfernung $R$, so muß sein

$$\frac{nw}{360}\frac{H}{r^2} = \frac{H}{R^2} \text{ oder } \frac{r^2}{R^2} = \frac{nw}{360}.$$

Die Messungen Plateaus stimmen mit diesem Gesetz auch genügend überein.

Ich selbst habe außerdem auch noch folgenden Weg eingeschlagen. Wenn man eine mit schmalen schwarzen und weißen Sektoren bedeckte Scheibe hat, so kann man eine scheinbar gleichmäßige Verteilung des Lichts der weißen Sektoren über die ganze Scheibe hervorbringen, indem man zwischen Auge und Scheibe eine konvexe Glaslinse bringt, welche die Akkommodation verhindert. Steht die Pupille im hinteren Brennpunkte der Linse, so daß das Bild, welches die letztere von der Scheibe entwirft, in die Fläche der Pupille fällt, und größer ist als die Pupille, so erscheint das Licht der hellen Sektoren gleichmäßig über das ganze durch die Linse gesehene Gesichtsfeld ausgegossen. Nähert man dagegen die Linse der Scheibe, so sieht das Auge mehr oder minder scharf die einzelnen weißen und schwarzen Sektoren, so lange die Scheibe stillsteht. Ist die Scheibe in Bewegung, so bleibt die Helligkeit gleich groß, man mag die Linse dem Auge oder der Scheibe näher bringen, woraus unmittelbar folgt, daß das Auge von dem intermittierenden Licht gleich stark, wie von einer gleichen Quantität kontinuierlich ankommenden Lichts affiziert wird.

Für farbiges Licht geht die Richtigkeit des oben hingestellten Satzes aus den Versuchen von Dove hervor über die Erscheinungen, welche rotierende Polarisationsapparate darbieten. Wenn zwischen zwei Nicolsche Prismen doppeltbrechende Kristallplatten eingeschaltet sind, so entstehen bekanntlich in vielen Fällen bei gewissen Stellungen der genannten Prismen Farben, die teils gleichmäßig über das ganze Feld verbreitet sind, teils farbige Figuren bilden. Bei allen diesen Erscheinungen bekommt aber jeder Punkt der Figur, wie theoretisch in der Lehre von der Polarisation des Lichts nachgewiesen werden kann, genau die Komplementärfarbe, wenn man das eine Nicolsche Prisma um einen rechten Winkel dreht. Der Versuch bestätigt es nun, daß bei schneller Rotation des einen Nicol das Auge Weiß sieht. Schaltet man noch ein farbiges Glas ein, so erhält man bei zwei um 90° verschiedenen Stellungen des einen Nicol Farben, welche vereinigt die Farbe des Glases geben müssen, und bei schneller Rotation auch wirklich geben.

Übrigens wird unser Gesetz für intermittierendes farbiges Licht auch bestätigt durch die Übereinstimmung, welche die Resultate der Farbenmischung auf der drehenden Scheibe mit denen haben, die man durch direkte Zusammensetzung des farbigen Lichts gewinnt, was in § 20 bei der Lehre von der Farbenmischung schon erwähnt ist. Will man die ganze Scheibe gleichmäßig mit der Mischfarbe überzogen sehen, so pflegt man die Scheibe in Sektoren abzuteilen und den einzelnen Sektoren verschiedene Färbung zu geben, die aber in der Ausdehnung jedes einzelnen Sektors ganz konstant sein muß. Dann erscheint bei der Rotation die ganze Scheibe in der Mischfarbe. Die Lichtstärke der Mischfarbe ist aber dabei nach dem obigen Gesetz immer das Mittel aus der Lichtstärke der einzelnen gemischten Farben, und da alle Farbstoffe bei gleicher Beleuchtung dunkler als weiß erscheinen, indem sie nur gewisse Farben, die einen Teil des gesamten weißen Lichts bilden, reflektieren, so ist auch die Mischfarbe immer lichtschwächer als Weiß, erscheint also, wenn sie wenig gesättigt ist, grau.

Führt man auf einer Farbenscheibe einen farbigen Stern auf andersfarbigem Grunde aus wie in Fig. 41, so sieht man bei der Rotation der Scheibe in der Mitte die Farbe des Sterns, am Rande die des Grundes, dazwischen alle kontinuierlichen Übergangsstufen der einen Farbe durch die Reihe der Mischfarben in die andere. Überhaupt kann man auf den rotierenden Scheiben die Hellig-

keit oder die Farbenmischung von der Mitte nach dem Rande hin nach jedem beliebig gewählten Gesetze sich ändern lassen, indem man die Kurven, welche die Sektoren begrenzen, passend wählt, wie wir z. B. schon in Fig. 37 dies Mittel benutzt haben, um eine bestimmte Verteilung des Halbschattens darzustellen.

Auf den rotierenden Scheiben beschreiben die einzelnen Punkte Kreislinien. Dieselbe Kontinuität des Eindrucks findet natürlich auch statt, wenn ein heller Punkt sich in irgend einer anderen geschlossenen Kurve bewegt. Überzieht man z. B. eine gespannnte Metallsaite mit schwarzer Farbe, macht einen Punkt der Saite wieder frei von dem dunkeln Überzuge, und beleuchtet ihn passend, so erscheint die Bahn dieses Punktes, wenn die Saite in Schwingungen gesetzt wird, als eine kontinuierliche oft sehr verschlungene Lichtlinie. Beschreibt der Punkt dabei einen Weg, der nicht genau in sich zurückkehrt, aber bei jedem folgenden Umlaufe doch der Bahn des früheren Umlaufs sehr nahe kommt, so erscheint dem Auge eine lichte Linie, die allmählich ihre Gestalt und Lage verändert. Wie man in dem angegebenen Beispiele die Schwingungsform einer Saite kennen lernt, so hat dasselbe Prinzip in der Physik noch eine große Zahl von anderen nützlichen Anwendungen erhalten.

Fig. 41.

Ist die Helligkeit des bewegten Punktes in seiner Bahn konstant, aber die Geschwindigkeit verschieden, so erscheint die Lichtlinie an den Punkten am hellsten, wo die Geschwindigkeit am geringsten ist. An solchen Stellen nämlich verweilt der helle Punkt verhältnismäßig längere Zeit, und sein Licht wirkt deshalb auch längere Zeit auf die entsprechenden Stellen der Netzhaut als an Stellen größerer Geschwindigkeit. Beobachtet man z. B. eine beleuchtete schwingende Saite, so erscheint diese am hellsten, da wo sie am weitesten von der Gleichgewichtslage entfernt ist, und wo ihre Geschwindigkeit für einen Augenblick gleich Null wird.

Hierher gehören auch die eigentümlichen Wirkungen intermittierender Beleuchtung, welche am schärfsten bei den regelmäßig wiederholten Funken der magnetelektrischen Induktionsapparate auftreten, sowohl bei denen mit rotierendem Anker, wie bei den Neefschen Apparaten mit schwingender Feder. Jeder einzelne Funken dieser Apparate hat eine unbestimmbar kurze Dauer, welche im Vergleich mit der Dauer aller Bewegungen materieller Körper unendlich klein erscheint, doch ist das Licht dieser Funken stark genug, um in dieser außerordentlich kurzen Zeit einen wahrnehmbaren Eindruck auf die Netzhaut zu machen. Bei der Erleuchtung durch einen einzelnen elektrischen Funken erscheinen alle bewegten Körper stillstehend. Das Auge kann sie natürlich nur so wahrnehmen, wie sie sich in dem Momente verhielten, wo sie beleuchtet waren, von ihrer Stellung vor und nach diesem Momente erfährt es nichts. Ist nun die Dauer der Beleuchtung so kurz, daß während derselben keine Verschiebung des bewegten Körpers von wahrnehmbarer Größe eintreten konnte, so erscheinen seine Umrisse ganz so scharf begrenzt, wie es bei vollkommener Ruhe der Fall sein würde.

Wenn sich nun eine Reihe von elektrischen Funken in sehr kleinen Zwischenzeiten folgt, so erscheinen ruhende Körper bei dieser Beleuchtung ganz

so, wie bei kontinuierlichem Lichte, bewegte Körper aber erscheinen mehrfach. Jeder einzelne Funke zeigt nämlich den bewegten Körper in der Lage, die er in dem betreffenden Augenblicke einnimmt, und da alle diese Eindrücke einen Augenblick dauern, so sind sie alle gleichzeitig vorhanden, und lassen den bewegten Körper als mehrfach vorhanden erscheinen. Je schneller die Bewegung des gesehenen Körpers ist, desto weiter rücken seine Bilder auseinander, weil der Weg, den er während jeder Intermission des Lichts zurücklegt, größer wird.

Ebenso erscheinen nun mehrfache Bilder, wenn nicht die Objekte, sondern das Auge bewegt wird. Wenn sich im Gesichtsfelde ein kontinuierlich leuchtender Punkt befindet, und wir das Auge bewegen, so rückt dabei das Bild des lichten Punktes auf eine andere Stelle der Netzhaut hinüber. Während der Bewegung trifft es nacheinander alle kontinuierlich aneinander stoßenden Punkte einer Linie, die den Ort seiner ersten und seiner letzten Lage verbindet; alle diese Punkte werden erregt, und es muß dadurch für einen Augenblick die Empfindung in der Netzhaut entstehen, welche bei ruhendem Auge eine lichte Linie hervorbringen würde. Gewöhnlich achten wir nicht auf diese Empfindung, weil sie eben jede Bewegung des Auges bei der Gegenwart lichter Objekte im Gesichtsfelde begleiten muß, wir bemerken es aber, wenn ungewöhnlicherweise bei intermittierendem Lichte die Kontinuität dieser Linie unterbrochen ist. Benutzen wir als lichtes Objekt die Stelle des Induktionsapparates, wo die Funken überschlagen, so erscheint bei Bewegungen des Auges der helle Punkt vervielfältigt. Denken wir uns nämlich auf der Netzhaut die Linie gezeichnet, welche das Bild der Funkenstelle beschreibt, so werden von den intermittierenden Funken nur einzelne Stellen dieser Linie erregt, denen entsprechend wir Bilder in das Gesichtsfeld projizieren.

Wenn ein bewegter Körper, den wir bei intermittierendem Lichte betrachten, eine in sich zurücklaufende Bahn beschreibt, und zur Zeit jedes Aufblitzens genau an derselben Stelle sich befindet, so erscheint er einfach und stillstehend. Z. B. erscheint die schwingende Feder oder der rotierende Anker der bekannten magnetelektrischen Induktionsapparate beim Lichte ihrer eigenen Funken stillzustehen. Dasselbe geschieht, wenn irgend ein anderer Körper von periodisch veränderlicher Gestalt durch intermittierendes Licht beleuchtet wird, und die Beleuchtung immer mit denselben Phasen seiner Veränderung zusammentrifft, z. B. wenn ein Wasserstrahl, der sich in Tropfen auflöst, so beleuchtet wird, daß im Moment der Beleuchtung ein neuer Tropfen immer wieder genau an derselben Stelle ist, so sieht der Beobachter den Strahl in stillstehende Tropfen aufgelöst. Dies geschieht, wenn die Periode der Beleuchtung genau gleich ist der Periode der Tropfenbildung oder einem Multiplum derselben. Fällt die Periode der Beleuchtung nicht genau zusammen mit der Periode der Tropfenbildung, oder einem Multiplum derselben, sondern ist jene ein weniges länger, so tritt eine scheinbare langsame Bewegung der Tropfen ein, welche die wirkliche Bewegung nachahmt, aber mit sehr verringerter Geschwindigkeit. Es werden dann von den folgenden Funken nicht genau dieselben Phasen der Tropfenbildung beleuchtet, wie von dem ersten, sondern immer weiter fortgeschrittene Zustände der folgenden Perioden dieser veränderlichen Erscheinung. Ist die Periode der Beleuchtung dagegen etwas kürzer, als die Periode der Tropfenbildung oder ein Multiplum derselben, so sieht der Beobachter die Erscheinung rückwärts vor sich gehen. Die Tropfen steigen zum Strahle hinauf und gehen in diesen über. Durch diese Verhältnisse wird es

möglich, diese und andere periodische Erscheinungen, welche so schnell vor sich gehen, daß der Beobachter sie mit dem Auge nicht unmittelbar erkennen kann, in ihren einzelnen Stadien sichtbar zu machen und zu analysieren. Einige künstlich hervorgebrachte Erscheinungen derselben Art werden unten bei Beschreibung der Apparate auseinandergesetzt werden.

Die Dauer des Lichteindrucks auf das Auge bestimmt man am leichtesten mit Hilfe von Farbenscheiben, die eine veränderliche und meßbare Umlaufsgeschwindigkeit haben. Mit Sicherheit läßt sich dabei nur die Umlaufsgeschwindigkeit bestimmen, welche nötig ist, um der Scheibe ein ganz gleichmäßiges Ansehen zu geben. Es zeigt sich dabei, daß sie desto größer gemacht werden muß, je größer die Lichtstärke ist. Auch scheinen die verschiedenen Farben dabei Unterschiede zu zeigen. Plateau ließ bei gewöhnlichem Tageslichte eine mit 12 weißen oder farbigen und 12 gleich breiten schwarzen Sektoren versehene Scheibe rotieren. Die Dauer des Vorübergangs eines schwarzen Sektors war also der 24. Teil der Umlaufszeit der Scheibe. Diese Zeit war, wenn die Scheibe einen gleichmäßigen Eindruck machte

| | Plateau. | Emsmann.[1] |
|---|---|---|
| für Weiß . . . . | 0,191 Sekunden | 0,25 Sekunden |
| „ Gelb . . . . | 0,199 „ | 0,27 „ |
| „ Rot . . . . | 0,232 „ | 0,24 „ |
| „ Blau . . . . | 0,295 „ | 0,22 bis 0,29. |

Auf die Vergleichung der verschiedenen Farben wird hierbei kaum viel Wert gelegt werden können, da ein Mittel ihre scheinbare Helligkeit genau gleich zu machen fehlte, und die Helligkeit einen sehr großen Einfluß auf die Dauer der Nachwirkung hat. Man erkennt dies leicht, wenn man einige Fuß entfernt von einer Lampe einen Farbenkreisel in Bewegung setzt, dessen Geschwindigkeit eben hinreicht einen gleichmäßigen Eindruck zu erzeugen, und dann die Lampe nähert, sogleich fängt die rotierende Fläche wieder an zu flimmern. Bei direkter Sonnenbeleuchtung muß man noch größere Drehungsgeschwindigkeiten anwenden. Übrigens sind Plateaus Zahlen auffallend groß. Ich selbst finde, daß bei stärkstem Lampenlicht, welches eine Scheibe mit gleichbreiten weißen und schwarzen Sektoren beleuchtet, der Vorübergang des Schwarz nur etwa $^1/_{48}$ Sekunde und auch bei sehr schwacher Beleuchtung im Lichte des Vollmonds nur $^1/_{20}$ Sekunde dauern darf, wenn alles Flimmern aufhören soll. Übrigens hat Plateau schon bemerkt, daß wenn man das Verhältnis zwischen der Breite der weißen und der der schwarzen Sektoren verändert, aber die Zahl der Sektoren konstant läßt, die Umlaufszeit dieselbe ist, bei der der Eindruck gleichmäßig wird. Man kann dies sehr leicht nachweisen durch eine Scheibe, wie Fig. 42, S. 180, an welcher die schwarzen Sektoren nach der Mitte, die weißen am Rande breiter sind. Das Flimmern hört bei steigender Umlaufsgeschwindigkeit in allen Abteilungen der Scheibe nahe gleichzeitig auf. Bei breiteren weißen Sektoren ist die Empfindung stärker, und sinkt deshalb schneller, sobald der Reiz fortfällt, daher die Pause, d. h. die Breite des schwarzen Sektors kleiner sein muß, als bei schmaleren weißen Sektoren. Es ist also wohl besser, bei den Messungen nach der Größe einer ganzen Periode der Beleuchtungsänderung zu fragen, d. h. nach der Summe der Dauer des Vorübergangs eines weißen

[1] Poggendorffs Ann. XCI. 611. (Über Bedeutung des Adaptationszustandes vergl. Zusatz I B 6. N.)

und schwarzen Sektors. Diese ist in meinen Versuchen bei stärkstem Lampenlicht also $^1/_{24}$, bei schwachem Licht $^1/_{10}$ Sekunde gewesen. Lissajou, welcher den Weg eines sehr hellen Lichtpunktes beobachtete, der die Bewegungen schwingender Stimmgabeln mitmachte, fand der helleren Beleuchtung entsprechend eine noch kürzere Zeit, nämlich $^1/_{30}$ Sekunde für die Zeit, während welcher die ganze Kurve kontinuierlich erschien.

Soll also eine rotierende Scheibe einen ganz gleichmäßigen Eindruck machen, so muß man sie 24 bis 30 mal in der Sekunde umlaufen lassen. Aber man kann dasselbe auch durch geringere Umlaufsgeschwindigkeiten erreichen, wenn man die Zeichnung in gleichen Winkelabständen regelmäßig wiederholt. So wird z. B. auf der Scheibe Fig. 42 das Schwarz und Weiß der 8 Sektoren des äußersten Rings sich schon bei 6 Umläufen der Scheibe zu gleichmäßigem Grau verbinden, das des mittleren Rings erst bei 12, das des innersten erst bei 24 Umläufen. Schwerer ist es, die Zeit zu bestimmen, während welcher der Eindruck in abnehmender Stärke nachdauert, ehe er ganz verlischt. Auch diese Zeit ist von der Lichtstärke abhängig, wie schon das früher Gesagte erkennen läßt. Die Nachdauer des hellen Sonnenbildes kann selbst bis zu einigen Minuten dauern. Während also die Wirkung hellen Lichts im Anfang am schnellsten abnimmt, hat sie doch im ganzen die längste Dauer, ähnlich wie ein heißer Körper in kühler Umgebung um desto mehr Temperaturgrade in gleicher Zeit sich abkühlt, je heißer er ist, aber auch desto längere Zeit braucht, ehe er seine höhere Temperatur ganz verloren hat. Plateau hat an seinen Farbenscheiben auch in dieser Beziehung Messungen angestellt, welche die Zeit des Vorübergangs eines schwarzen Sektors ergeben, wenn die Farbe der hellen Sektoren sich über die schwarzen so ausgebreitet hatte, daß das Schwarz nirgends mehr rein erschien. Es ergab sich

Fig. 42.

| | | |
|---|---|---|
| für Weiß . . . . . | 0,35 | Sekunden |
| für Gelb . . . . . | 0,35 | „ |
| für Rot . . . . . | 0,34 | „ |
| für Blau . . . . . | 0,32 | „ |

Eine verschiedene Dauer der Nachwirkung für die verschiedenen Farben zeigt sich auch noch in den Farbenveränderungen, welche das Nachbild eines weißen Lichts auf dunklem Grunde erleidet, ehe es ganz verschwindet. Da sich diese Erscheinungen aber mit denen, welche im folgenden Paragraphen beschrieben werden sollen, mannigfaltig vermischen, so möge erst dort ihre genauere Beschreibung folgen.

Aus den in diesem Paragraphen geschilderten Tatsachen geht hervor, daß Licht, welches die Netzhaut getroffen hatte, im Sehnervenapparate eine primäre Wirkung hinterläßt, die erst in den nächstfolgenden Augenblicken sich in Empfindung umsetzt. Die Größe der primären Veränderung, die ein momentaner Lichteindruck zurückläßt, hängt nur von der Quantität Licht ab, die auf den betreffenden Teil der Netzhaut gefallen ist, wobei es einerlei ist, ob sehr intensives

Licht eine kurze Zeit, oder schwächeres eine längere Zeit gewirkt hat, vorausgesetzt nur, daß die Zeit der Einwirkung überhaupt kleiner als $^2/_{30}$ Sekunde gewesen ist. Die augenblickliche primäre Wirkung sehr intensiven Lichts fällt also nicht verhältnismäßig schwächer aus, als die mäßigen Lichts, wie dies doch bei dauernder Empfindung des Lichts von verschiedener Stärke der Fall ist.

Es liegt hierin kein Widerspruch, wie es wohl scheinen könnte, denn den Mangel der Proportionalität fanden wir zwischen der objektiven Lichtintensität und der fertig ausgebildeten Empfindung, hier haben wir es dagegen nur zu tun mit der augenblicklichen primären Wirkung, die erst später in Empfindung übergehen wird, und es ist kein Hindernis anzunehmen, daß die augenblickliche primäre Wirkung in der Nervenmasse einem anderen Gesetze der Größe folge, als die sekundäre Wirkung, die Empfindung. Das ganze Verhältnis wird vielleicht am klarsten durch den Vergleich mit einem Magneten, der in einem galvanischen Multiplikator aufgehängt ist, und durch einen intermittierenden Strom von hinreichend schnellen Intermissionen abgelenkt wird. Auch in diesem Falle hängt die Ablenkung nur ab von der gesamten Menge von Elektrizität, welche in der Zeiteinheit durch den Draht fließt, ohne doch dieser Menge proportional zu sein. Auch hier existiert aber eine der Elektrizitätsmenge jedes einzelnen momentanen Stromes proportionale Wirkung, nämlich die kleine Geschwindigkeit, welche er dem Magneten im Sinne der Ablenkung mitteilt, und welche bis zum Eintritt des nächsten Stromes durch die Wirkung des Erdmagnetismus wieder aufgehoben sein muß, wenn die Ablenkung des Magneten konstant bleiben soll. Der Magnet erscheint kontinuierlich ruhend abgelenkt, wenn die Schwankungen in seiner Lage, welche die einzelnen Stromstöße hervorbringen, zu klein sind, um wahrgenommen zu werden, und ein intermittierendes Licht gibt eine kontinuierliche Empfindung, wenn die Schwankungen in der Stärke der Empfindung kleiner sind, als die kleinsten wahrnehmbaren Stufen der Empfindung.

Was die Einrichtung der rotierenden Scheiben betrifft, welche Muschenbroek[1] zuerst erwähnt, so sind die einfachsten die Kreisel. Ich pflege für die meisten Versuche einen einfachen aus Messing gedrehten Kreisel zu benutzen, dessen Querschnitt in Fig. 43 in $^1/_3$ Größe dargestellt ist. Er wird mit der Hand in Bewegung gesetzt. Man kann ihn deshalb in jedem Augenblicke leicht und ohne Vorbereitung in Bewegung setzen, seine Geschwindigkeit nach Belieben verstärken oder mäßigen, aber allerdings entspricht das Maximum der Geschwindigkeit, was man ihm mit den Fingern mitteilen kann, nur ungefähr 6 Umdrehungen in der Sekunde, wonach er 3 bis 4 Minuten in Bewegung bleibt. Wegen der geringen Rotationsgeschwindigkeit bekommt man einen ganz gleichmäßigen Lichteindruck nur wenn die Scheiben in 4 oder 6 Sektoren geteilt, und in jedem die gleiche Verteilung von Farben, Licht und Schatten angebracht ist. Ist die Zahl der gleichen Wiederholungen der Zeichnung eine geringere, so gibt es wenigstens bei starker Beleuchtung ein mehr oder weniger schillerndes Ansehen der Scheibe. Die Zeichnungen kann man selbst während des

Fig. 43.

[1] Introductio. § 1820.

Ganges der Scheibe leicht darauf werfen, und kann auch leicht Veränderungen hervorbringen, wenn man auf eine volle Scheibe eine mit ausgeschnittenen Sektoren wirft, deren Lage auf der unteren man durch Hinstreifen mit den Fingern oder durch Blasen mit dem Munde verändern kann; so lassen sich während des Ganges der Scheibe sehr mannigfaltige Variationen hervorbringen.

Gibt man der Scheibe z. B. gleich breite blaue und rote Sektoren, und legt darauf eine Scheibe mit gleich breiten Sektoren, von denen man den ersten, dritten,

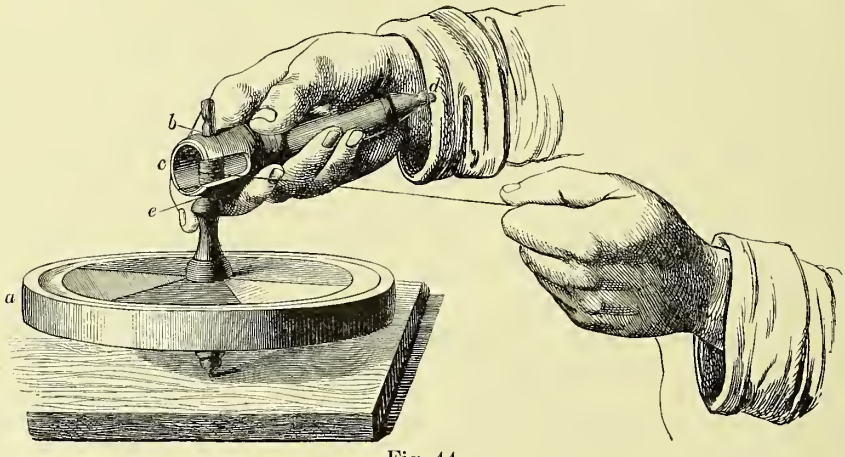



Fig. 44.

fünften usw. schwarz gemacht hat, während der zweite, vierte, sechste usw. fortgeschnitten ist, so wird bei der Rotation die ganze Scheibe blau sein, wenn die schwarzen Sektoren der oberen Scheibe auf die roten der unteren fallen, und diese verdecken, dagegen wird die Scheibe rot erscheinen, wenn die schwarzen Sektoren der oberen Scheibe auf die blauen der unteren fallen, in den Zwischenlagen erhält man verschiedene Mischungen von Rot und Blau, und kann daher während des Ganges der Scheibe die eine Farbe allmählich in die andere übergehen lassen, wenn man durch Überstreifen mit dem Finger oder durch Blasen die Lage der oberen Scheibe verändert. Begrenzt man die verschiedenen Sektoren nicht durch gerade, sondern durch krumme oder gebrochene Linien, so kann man leicht sehr mannigfache und bunte Wechsel von Ringsystemen erzeugen.

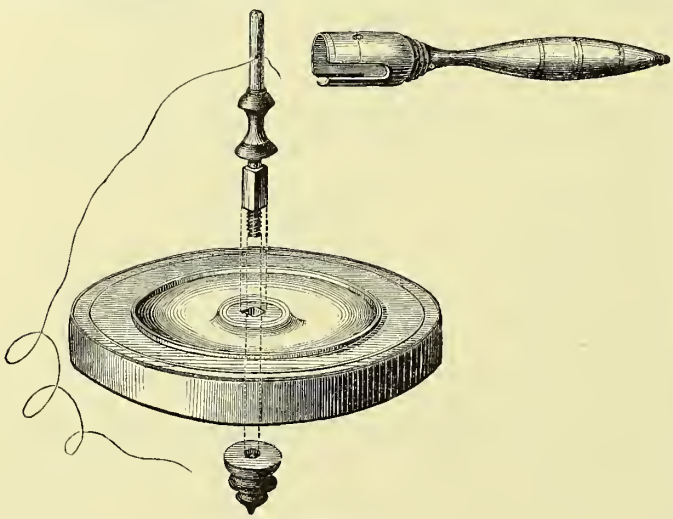


Fig. 45.

Um den Kreiseln größere Geschwindigkeit zu geben, müssen sie durch ein um ihren Stiel geschlungenes Band, welches man abzieht, in Bewegung gesetzt werden. Die einfachste Einrichtung dazu ist die in Fig. 44 abgebildete. Es dient dazu ein

hölzerner Hohlzylinder *c*, der an einem Stiele *d* sitzt, bei *b* und *e* zwei einander gegenüberstehende Durchbohrungen seiner Mantelfläche hat, und von beiden um einen rechten Winkel entfernt einen Einschnitt. Man steckt den Stiel *b* des Kreisels durch die Öffnungen des Zylinders, führt das Ende eines starken Fadens durch eine Durchbohrung des Stiels, und dreht mit dem Finger den Kreisel, bis der Faden aufgewickelt ist. Der Teil des Stiels, um den der Faden aufgewickelt ist, wird dadurch so dick, daß er nicht mehr aus der Hülse *c* hinausgleiten kann. Hält man nun den Kreisel mittels der Hülse nahe über einem Tische, zieht den Faden kräftig ab, so kommt der Kreisel in schnelle Rotation, und fällt, sobald der Faden abgewickelt ist, auf den Tisch herab, wo er lange weiter läuft. Der in Fig. 45 nach seiner Zusammensetzung abgebildete Kreisel ist so eingerichtet, daß man die Scheiben mittels des Stiels festklemmen kann, wie dies bei den Versuchen von Maxwell zur Bestätigung des Newtonschen Gesetzes der Farbenmischung nötig ist. Man braucht dazu eine Reihe kleinerer und größerer runder Scheiben aus steifem Papier mit einer zentralen Öffnung und einem radialen Schlitz, wie Fig. 46 zeigt. Jede Scheibe wird nur mit einer Farbe gleichmäßig überzogen; legt man zwei oder mehrere aufeinander und schiebt sie gegenseitig durch ihre Schlitze hindurch, so werden auf jeder Seite Sektoren der einzelnen Scheiben von beliebig veränderlicher Breite sichtbar, so daß das Mischungsverhältnis der Farben kontinuierlich geändert werden kann.

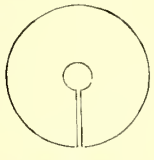


Fig. 46.

Die vollkommenste Konstruktion für einen Kreisel, der nur bei sehr schneller Bewegung gebraucht werden soll, bietet der Busoldsche Farbenkreisel dar (Fig. 47). Er besteht aus einer fünf Pfund schweren Scheibe, die aus einer Legierung von Zink und Blei gegossen ist, ein Dezimeter im Durchmesser. Die Achse von Messing läuft unten auf einer fein abgerundeten Spitze von nicht gehärtetem Stahl. Der zylindrische Teil der Achse ist rauh gemacht, damit die Schnur fest darauf liegen kann. Will man den Kreisel in Bewegung setzen, so wird seine Achse nach Umwickelung mit der Schnur in die Einschnitte der eisernen Arme *dd* eingelegt, ein Teller untergestellt, und mit der rechten Hand die Schnur kräftig abgezogen, während die linke sich gegen den Hebel *e* stützt. Der Kreisel muß vor dem Abziehen möglichst nah am Rande des Tellers stehen, die Schnur einen halben Fuß kürzer sein, als die ausgespannten Arme messen, und an ihrem Ende mit einer Handhabe versehen sein. Wenn der Kreisel läuft, zieht man den Teller mit dem Kreisel unter den Armen des Hebels *e* hervor. Dieser, welcher um eine Achse bei *c* drehbar ist, hebt sich dabei nach oben. Bei kräftigem Abziehen der Schnur kann man bis 60 Umdrehungen in der Sekunde hervorbringen, und die Bewegung hält 45 Minuten an.

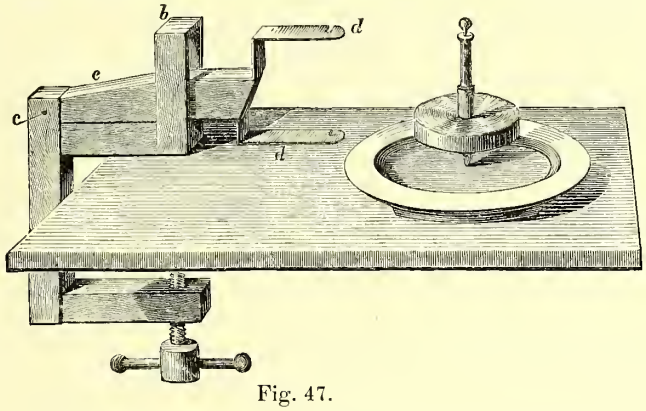



Fig. 47.

Außer den Kreiseln hat man nun auch vielfältig Scheiben benutzt, deren Achse in zwei Zapfenlagern läuft, und die entweder durch ein Uhrwerk, oder eine unendliche Schnur, oder durch Abziehen einer Schnur wie die Kreisel in Bewegung gesetzt werden. Im allgemeinen tritt bei diesen Apparaten die Unbequemlichkeit ein, daß man die Scheiben nicht wechseln kann, ohne den Apparat anzuhalten und die Scheibe aus ihren Achsenlagern zu entfernen. Andererseits hat man den Vorteil, die

Scheibe in vertikaler Stellung umlaufen lassen zu können, wobei ein großes Auditorium sie gleichzeitig sehen kann, was bei den Kreiseln nicht so leicht zu erreichen ist. Mischung der Farben hat Montigny auch durch ein rotierendes Prisma erreicht, dessen objektives Spektrum er über einen weißen Schirm laufen ließ.

Das Thaumatrop ist ein rechteckiges Täfelchen, welches man um eine Achse, die durch die Mitte der längeren Seiten geht, rotieren läßt. Auf die eine Seite ist etwa ein Vogel gemalt, auf die andere der Käfig. Wenn man schnell rotieren läßt, scheint der Vogel im Käfig zu sitzen. Es ist jetzt als Kinderspielzeug bekannt, erfunden von Dr. Paris[1].

Es schließen sich hieran die zusammengesetzteren Apparate an, welche eine rotierende Scheibe durch gleichzeitig rotierende Spalten sehen lassen. Dazu gehören zunächst die stroboskopischen Scheiben von Stampfer, welche gleichzeitig und unabhängig von Plateau erfunden und mit dem Namen des Phänakistoskops belegt wurden[2].

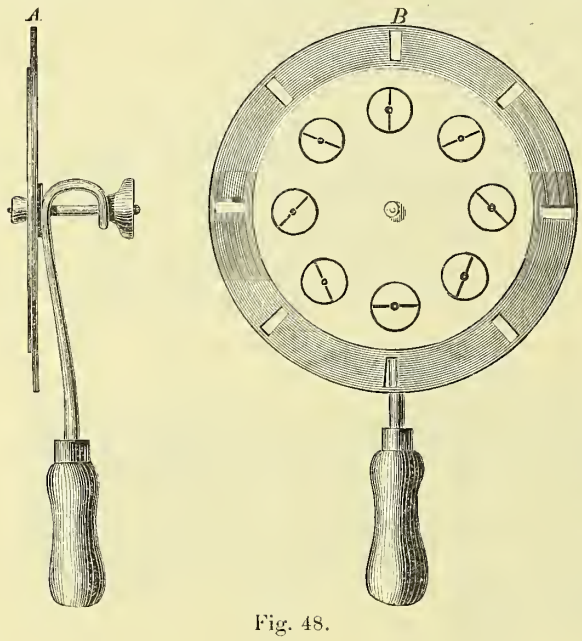


Fig. 48.

Die stroboskopischen Scheiben sind Papierscheiben von 6 bis 10 Zoll Durchmesser (Fig. 48), auf denen sich im Kreise gestellt und in gleichen Entfernungen voneinander eine Anzahl (8 bis 12) von Figuren befindet, welche eine Reihe von Momenten irgend einer periodisch wiederkehrenden Bewegung darstellen. Eine solche Scheibe wird konzentrisch auf eine zweite etwas größere dunkle Scheibe gelegt, die am Rande ebensoviel Öffnungen hat, als die erstere Figuren, und beide zusammen mittels einer Schraubenmutter auf das vordere Ende einer kleinen eisernen Achse befestigt, die im oberen Ende eines passenden Handgriffs angebracht ist. Beim Gebrauche des Instruments stellt man sich vor einen Spiegel, wendet die Scheibe mit den Figuren gegen diesen, stellt das Auge so, daß man durch eines der Löcher am Rande der größeren Scheibe das Spiegelbild der Figuren sieht, und setzt nun die Scheiben in Rotation. Dann scheinen die Figuren, die man im Spiegel sieht, die Bewegung auszuführen, deren Akte dargestellt sind, ohne sich dabei von der Stelle zu bewegen.

Bezeichnen wir diese Öffnungen mit Ziffern, so daß das Auge zuerst durch die Öffnung 1 sehe, dann, wenn die Scheibe weiter rotiert, durch die Öffnung 2 usw., und bezeichnen wir ferner die Figuren, die auf den zur Öffnung 1, 2, 3 usw. gehenden Radien stehen, mit denselben Ziffern, so wird zunächst der Beobachter, in-

[1] *Edinb. Journal of Science.* VII. 87. Poggendorffs Ann. X. 480.

[2] Plateau schickte schon im November 1832 durch Quetelet ein Exemplar an Faraday; Stampfer verfertigte die erste im Dezember 1832. Plateau beschrieb seine Erfindung in einem vom 20. Januar 1833 datierten Schreiben in der *Correspondance math. et physique de l'observat. de Bruxelles* VII. 365, Stampfer in einer besonderen Schrift: „Die stroboskopischen Scheiben oder optischen Zauberscheiben, deren Theorie und wissenschaftliche Anwendung", deren Vorrede vom Juli 1833 datiert ist.

dem er durch die Öffnung 1 nach dem Spiegel sieht, auf dem Radius, der im Spiegelbilde der Scheibe nach dem Spiegelbilde seines Auges hinweist, die Figur 1 erblicken. Wenn er nun die Scheibe dreht, so geht die Öffnung 1 vor seinem Auge vorbei, das Spiegelbild wird ihm zunächst durch die dunkle Pappscheibe ganz verdeckt, und erst wenn die Öffnung 2 vor seinem Auge ankommt, erblickt er es wieder. Nun steht aber die Figur 2 an demselben Orte, wo sich vorher Fig. 1 befand, nämlich auf dem Radius, der vom Mittelpunkt der Scheibe nach dem Auge des Beobachters geht. Es folgt wieder Dunkelheit, bis Öffnung 3 vor das Auge tritt, und nun Figur 3 an demselben Platze erscheint, wo vorher 1 und 2 sich befanden. Wären nun diese Figuren alle einander gleich, so würde der Beobachter eine Reihe voneinander getrennter unter sich aber gleicher Gesichtseindrücke erhalten, welche bei hinreichend schneller Wiederholung in eine andauernde Empfindung verschmelzen, die einem ruhenden Objekte entspricht. Wenn die Figuren dagegen voneinander ein wenig verschieden sind, so verschmelzen die getrennten Lichteindrücke auch zu dem Bilde eines Gegenstandes, aber dieser verändert sich scheinbar fortdauernd, so wie es die Reihenfolge der Bilder mit sich bringt.

Wenn die Zahl der Figuren nicht gleich der der Löcher ist, so erscheinen die Figuren in vor- oder rückschreitender Bewegung. Denken wir uns $n$ Löcher und $m$ Figuren, die Zahlen $m$ und $n$ aber nur wenig verschieden, und zu Anfang eine der Figuren auf dem Radius stehend, der nach dem Auge des Beobachters, welches durch eine Öffnung schaut, hinweist. Wird die Scheibe um den Bogen $\frac{2\pi}{n}$ gedreht, so tritt wieder eine Öffnung vor das Auge des Beobachters. Die zweite Figur ist dann aber um einen Bogen $\left(\frac{2\pi}{n} - \frac{2\pi}{m}\right)$ von dem genannten Radius entfernt. Ist dieser Bogen nun klein genug, so daß die zweite Figur sich jetzt näher an dem erstgesehenen Orte der ersten Figur befindet, als jede andere jetzt sichtbare Figur, so identifizieren wir die jetzt gesehene zweite mit der früher gesehenen ersten Figur, und glauben die letztere um das entsprechende Bogenstück fortbewegt zu sehen. Gewöhnlich macht man $m$ gleich $n + 1$ oder gleich $n - 1$. Im ersteren Falle schreiten die Figuren in dem Sinne fort, wie die Scheibe sich dreht, im zweiten Falle entgegengesetzt.

Je schmaler man die Öffnungen der größeren Scheibe macht, desto schärfer begrenzt werden die Bilder gesehen, aber desto lichtschwächer werden sie auch. Um die Bilder objektiv an die Wand zu werfen, hat Uchatius[1] einen Apparat konstruiert. Sehr nützlich verwendet sind sie von J. Müller[2], um die Vorgänge der Wellenbewegung zu versinnlichen.

Das Dädaleum von W. G. Horner ist ein ähnliches Instrument, nur sind die Löcher auf dem Mantel eines hohlen Zylinders angebracht, und die Bilder teils auf der Innenfläche des Mantels (am besten transparent), teils auf der Grundfläche.

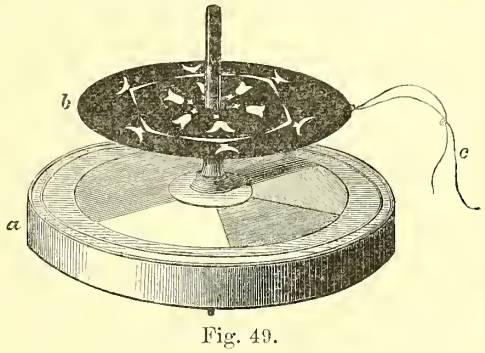


Fig. 49.

Bei den bisher beschriebenen Apparaten rotieren die Figuren und die Öffnungen mit derselben Winkelgeschwindigkeit; eine andere Reihe von Erscheinungen zeigt sich, wenn sie mit verschiedener Winkelgeschwindigkeit rotieren.

Einer der einfachsten Apparate dieser Art ist der in Fig. 44 dargestellte

[1] Sitzungsberichte der k. k. Akad. zu Wien. X. 482.
[2] Poggendorffs Ann. LXVII. 271.

Kreisel von J. B. Dancer in Manchester, wenn man auf dem Vorsprung der Achse noch eine zweite Scheibe ruhen läßt, in welcher Öffnungen verschiedener Gestalt angebracht sind, und an deren Rand ein Stück Faden angeknüpft ist, wie es Fig. 49 darstellt. Diese obere Scheibe rotiert mit wegen der Reibung, die sie an der Achse erleidet, aber ihre Rotation ist langsamer als die des Kreisels, wegen des großen Luftwiderstandes an dem mit ihr herumfliegenden Faden. Enthält die untere Scheibe mehrere verschiedengefärbte Sektoren, so sieht man die in die obere Scheibe eingeschnittenen Figuren vervielfältigt und in den verschiedenen Farben der unteren Scheibe ausgeführt, ein sehr buntes Bild, was bald kontinuierlich, bald springend sich zu bewegen scheint.

Betrachten wir eine einzelne Öffnung der oberen Scheibe und rechnen die Drehungswinkel von der Stelle ab, wo sie sich zu Anfang der betrachteten Zeit befindet. Ein in der verlängerten Achse des Kreisels befindliches Auge wird durch die Öffnung eine der Farben der unteren Scheibe erblicken, und diese Stelle gelte auf der unteren Scheibe als Nullpunkt für die Messung der Winkel. Die obere Scheibe laufe $m$ Male, die untere $n$ Male in der Sekunde um, beide in gleicher Richtung, so ist der Bogen, um den sich jeder Punkt der oberen Scheibe in der Zeit $t$ fortbewegt, gleich $2\pi m t$, und für die Punkte der unteren Scheibe ist derselbe gleich $2\pi n t$. Von zwei Punkten der oberen und unteren Scheibe, die anfangs übereinander standen, ist also nach der Zeit $t$ der untere um den Bogen $2\pi(n-m)t$ voraus, und daraus folgt, daß durch die Öffnung der oberen Scheibe zur Zeit $t$ ein Teil der unteren Scheibe gesehen wird, der um den Bogen $2\pi(m-n)t$ auf dieser von dem anfangs gesehenen Punkte entfernt ist, wobei positive Bogen im Sinne der Drehung, negative rückwärts zu rechnen sind. Wenn also $t = \frac{1}{n-m}$ geworden ist, werden sämtliche Farben der unteren Scheibe einmal in der Öffnung der oberen erschienen sein, und ihre Reihe wird wieder vom Anfang beginnen, und sich wiederholen. Während dieser Zeit ist aber die Öffnung selbst um den Bogen $2\pi m t = 2\pi \frac{m}{n-m}$ fortgerückt, und die Reihe der Farben, wie sie sich in der Öffnung folgten, muß über diesen Bogen ausgebreitet erscheinen, und zwar in umgekehrter Ordnung, als sie auf der Scheibe stehen, wenn, wie in dem beschriebenen Apparate der Fall ist, $n > m$. Dieselbe Reihe von Farben folgt nun wieder, während die Öffnung sich über einen zweiten, dritten usw. Bogen von der Länge $2\pi \frac{m}{n-m}$ fortbewegt. Ist nun

$$\frac{m}{n-m} = \frac{1}{p}, \text{ also } n = (p+1)m$$

und $p$ eine ganze Zahl, so wird sich nach einem ganzen Umlauf der oberen Scheibe die Farbenreihe in der Öffnung gerade $p$ Male wiederholt haben, und bei jedem folgenden Umlauf, wie beim ersten, genau an derselben Stelle wieder erscheinen. Es erscheint dann auf der oberen Scheibe ein ruhender farbiger Ring, mit $p$-maliger Wiederholung der Farben der unteren Scheibe. Ist $p$ nicht genau gleich einer ganzen Zahl, so werden die Orte der Farben beim zweiten Umlaufe nicht mehr ganz genau mit denen des ersten Umlaufs zusammenfallen, der Farbenring wird sich fortzubewegen scheinen.

Wenn

$$\frac{m}{n-m} = \frac{2}{2p+1}, \text{ also } n = \left(p + \frac{3}{2}\right) m$$

und $p$ eine ganze Zahl ist, so werden beim zweiten Umlaufe die Farben neue Orte einnehmen, beim dritten aber dieselben wie beim ersten, beim vierten wie beim zweiten, so daß doch eine ruhende Farbenerscheinung entstehen kann, wenn nur der

Kreisel schnell genug läuft, daß der Eindruck auf das Auge die Zeit zweier Umläufe der Öffnung überdauert. Man erhält dann eine $(2p + 1)$-malige Wiederholung der gleichen Farbenfolge, diese selbst ist aber nicht mehr gleich der Folge der Farben der unteren Scheibe, sondern stellt die Mischungen je zweier Farben dieser Scheibe dar, welche auf den entgegengesetzten Hälften derselben Durchmesser liegen. Wenn z. B. $p = 1$, also $\frac{m}{n-m} = \frac{2}{3}$, so wird die Anfangsfarbe wiedererscheinen bei

$0^0$
$240$
$480$ d. h. $120^0$
$720$ „ $0$
$960$ „ $240$
usw.,

also immer wieder bei $0^0$, $120^0$, $240^0$. Die Farbe dagegen, welche auf der unteren Scheibe auf der anderen Hälfte desselben Durchmessers steht, wird in der Mitte dieser Bogen erscheinen, als bei

$120^0$
$360$ d. h. bei $0^0$
$600$ „ $240$
usw.,

also an denselben drei Stellen, wird sich also mit der ersten Farbe mischen.

Im allgemeinen ergibt sich leicht, daß wenn der Bruch $\frac{m}{n-m}$ in kleinsten ganzen Zahlen ausgedrückt gleich $\frac{q}{p}$ ist, und der Eindruck im Auge $q$ Umdrehungen der oberen Scheibe überdauert, man $p$ Wiederholungen einer Folge von Farben sieht, die entstehen, indem je $q$ äquidistante Farben der unteren Scheibe gemischt werden. Dauert der Eindruck im Auge aber nicht so lange, so erscheinen die Farben hin- und herspringend.

Wenn man die Form, Zahl und Größe der Öffnungen in der oberen Scheibe variiert, entstehen auf diese Weise natürlich sehr bunte kaleidoskopische Bilder. Diese Bilder werden bei der beschriebenen Einrichtung noch bunter und erhalten sehr feine Zeichnungen dadurch, daß eigentümliche Oszillationen der oberen Scheibe eintreten. Man hört nämlich ein lautes Schnarren des Kreisels, sobald man die obere Scheibe aufgelegt hat, und wenn man als untere Scheibe eine rein weiße gewählt hat, so sieht man die Figur der oberen Scheibe nicht sich in ein System konzentrischer Kreislinien verwandeln, wie es sein müßte, wenn die obere Scheibe mit gleichmäßiger Geschwindigkeit rotierte, sondern man sieht eine große Zahl von Wiederholungen der eingeschnittenen Figur. Dies läßt schließen, daß die Rotationsbewegung der oberen Scheibe in regelmäßiger Abwechselung verzögert und beschleunigt ist. Diese Oszillationen müssen durch die Reibung der oberen Scheibe an der Achse hervorgebracht sein. Außerdem findet ein zweites System von Oszillationen statt, wobei der Mittelpunkt der oberen Scheibe horizontal hin- und hergeht; was man aus gewissen Eigentümlichkeiten der Figur, wie sie über weißer Unterlage erscheint, erkennen kann.

Regelmäßiger zeigt das von Plateau konstruierte Anorthoskop diese Erscheinungen. Zwei kleine Rollen von verschiedenem Durchmesser, deren Achsen in derselben geraden Linie unmittelbar hintereinander liegen, werden durch zwei unendliche Schnüre herumgetrieben, welche beide um die Peripherie derselben größeren Scheibe laufen; letztere wird mittels einer Kurbel bewegt. An der einen Rolle ist eine transparente Scheibe befestigt, auf der sich eine verzerrte Zeichnung befindet, an der

anderen eine schwarze Scheibe mit einem oder mehreren Spalten. Wenn man die Scheiben rotieren läßt, kommt die richtige Zeichnung zum Vorschein.

Wir haben gesehen, daß wenn $m$ die Zahl der Umläufe des Schirms in der Sekunde bezeichnet, und $n$ die der Zeichnung, daß auf einem Bogen $2\pi\frac{m}{n-m}$, den ein Punkt der spaltförmigen Öffnung des Schirms durchläuft, alle die Punkte der Zeichnung der Reihe nach erscheinen, die ebenso weit wie jener Punkt vom Mittelpunkte entfernt sind. In dem Zerrbilde des Objekts auf der transparenten Scheibe nehmen aber diese Punkte die ganze Peripherie ein. Denkt man sich also in dem Original und seinem Zerrbilde die Punkte durch Polarkoordinaten gegeben, nämlich durch ihre Entfernung vom Mittelpunkte der Scheibe $\varrho$ und durch den Winkel $\omega$, den der Radius Vektor mit einem festen Radius bildet, und nennen wir $\varrho_0$ und $\omega_0$ die Werte für die richtige Zeichnung, $\varrho_1$ und $\omega_1$ für die verzerrte, so ist

$$\varrho_0 = \varrho_1$$
$$\omega_0 : \omega_1 = m : (m - n).$$

Mit Hilfe dieser Gleichungen kann die verzerrte Zeichnung konstruiert werden, indem man die Winkel $\omega$ in dem angegebenen Verhältnisse verändert. Damit bei jedem Umlauf der Scheiben dieselben Figuren wieder sichtbar werden, muß wie früher der Bogen $2\pi\frac{m}{m-n}$ ein aliquoter Teil der Peripherie sein, also $\frac{m}{m-n}$ eine positive oder negative ganze Zahl.

Sind die Scheiben beide gleichläufig, also $m$ und $n$ positiv, $n > m$, so haben $\omega_0$ und $\omega_1$ entgegengesetztes Zeichen, müssen also nach entgegengesetzter Richtung gelegt werden. Es wird $\frac{m-n}{m} = 1 - \frac{n}{m}$ eine negative ganze Zahl, wenn $\frac{n}{m}$ eine ganze Zahl $p$ ist, d. h. die transparente Scheibe $p$ ganze Umläufe macht, während die dunkle Scheibe einen macht. Das Bild wiederholt sich $(p - 1)$ Male auf dem Umfang der Scheibe. Man kann in diesem Falle $p$ äquidistante radiale Spalten in der schwarzen Scheibe anbringen.

Wenn die beiden Scheiben in entgegengesetzter Richtung umlaufen, also $m = -\mu$ ist, so wird

$$\omega_0 : \omega_1 = \mu : (n + \mu).$$

Die beiden Winkel sind also nach der gleichen Seite hin zu nehmen. Wenn $\frac{n}{\mu} = p$ und $p$ eine ganze Zahl, so wird die Zahl der Bilder gleich $p + 1$, und man kann wieder $p$ Spalten in der dunklen Scheibe anbringen.

Wenn endlich die Rotationen gleichläufig sind, $m$ und $n$ also positiv, aber $m > n$, so bekommen $\omega_0$ und $\omega_1$ wieder dasselbe Zeichen, aber während in den bisherigen Fällen $\omega_1$ gleich oder größer als $\omega_0$ war, wird es nun kleiner. In den bisher beschriebenen Fällen konnte das Zerrbild die ganze Peripherie des Kreises einnehmen, jedes einzelne richtige Bild nahm dann nur einen aliquoten Teil der Peripherie ein. In dem jetzigen Falle aber ist der höchste Wert von $\omega_0$ offenbar $2\pi$, und demgemäß der höchste von $\omega_1 = \left(1 - \frac{n}{m}\right) 2\pi$. Es kann das Zerrbild deshalb auch auf der transparenten Scheibe mehrmals wiederholt werden, ja es wird vorteilhaft sein, es zu wiederholen, um mehr Licht zu erhalten. Damit dann immer dieselbe Erscheinung wiederkehre, muß der bezeichnete Maximalwert von $\omega_1$ ein aliquoter Teil der Peripherie sein, d. h. $\frac{m}{m-n}$ muß eine ganze Zahl $p$ sein, also

$$\frac{n}{m} = \frac{p-1}{p}.$$

Dabei ist die Anzahl der möglichen Wiederholungen des Zerrbildes $p$, das richtige Bild einfach. Die Zahl der Spalten kann gleich $p - 1$ gemacht werden.

Man kann aber auch in diesem Falle die Spalte einfach lassen, und das Zerrbild in seinen Wiederholungen etwas verändern. so daß es verschiedene Momente einer Bewegung darstellt, dann erhält man ein richtiges Bild, was diese Bewegung auszuführen scheint.

Sollen die geforderten Verhältnisse der Umdrehungszahlen $m$ und $n$ genau eingehalten werden, so kann man dies nur erreichen, wenn man die Achsen durch Zahnräder in Bewegung setzt. Bei den Rollen stimmen die Verhältnisse der Durchmesser und die Beschaffenheit der Fäden nie so genau überein. daß nicht allmählich kleine Abweichungen von dem geforderten Verhältnisse eintreten, und dann drehen sich die restaurierten Bilder auf der Scheibe allmählich um deren Mittelpunkt. Diese unvermeidliche Ungenauigkeit der Schnurläufe hat Plateau übrigens benutzt, um einen sehr allmählichen Farbenwandel hervorzubringen, indem er zwei Rollen aufsetzt, welche, so gut es geht, einander gleich gemacht sind, an der einen eine transparente Scheibe mit gleich breiten farbigen Sektoren befestigt, an der anderen eine schwarze Scheibe, in der ein oder zwei gleiche Sektoren ausgeschnitten sind. Wenn die Öffnung anfangs gerade vor einem der farbigen Sektoren der hinteren Scheibe steht, wird bei der Rotation das ganze Feld in dieser Farbe erscheinen, allmählich aber werden sich die Scheiben gegeneinander verschieben, es wird von einem anderen Sektor der farbigen Scheibe anfangs wenig, allmählich immer mehr frei werden, und dessen Farbe daher sich stärker und stärker einmischen, während die des ersten in demselben Verhältnisse verschwindet. So erhält man einen sehr leise und allmählich eintretenden Farbenwandel.

Es gehören hierher auch noch gewisse Kurven, welche erscheinen, wenn zwei Reihen von geraden und gekrümmten Stäben sich hintereinander bewegen. Das erste Beispiel davon, welches Aufsehen erregte, waren gewisse Figuren, welche an den Rädern eines Wagens erscheinen, wenn ein solcher hinter einem Gitter vorbeifährt[1]. Am einfachsten von den hierher gehörigen Fällen ist die von Faraday beobachtete Erscheinung. Er ließ zwei gleiche Zahnräder hintereinander in entgegengesetzter Richtung schnell rotieren, so daß ihre Achsen in einer geraden Linie lagen. Während nun von jedem einzeln gesehen die Zähne wegen der Schnelligkeit der Bewegung verschwinden, sah er ein Rad mit doppelt so viel Zähnen stillstehend, wenn er sie so betrachtete, daß die eine Zahnreihe durch die andere hin erschien. Denken wir uns die Zähne hell auf dunklem Grunde, so wird durch die schnell umlaufenden hellen Zähne jedes einzelnen Rades eine gewisse Menge Licht über den Grund scheinbar gleichmäßig ausgebreitet, und durch beide Zahnreihen zusammen die doppelte Menge Licht an solchen Stellen des Grundes, wo hintereinander bald von der einen, bald von der anderen Reihe ein Zahn hinüberläuft. Wo aber ein Zahn der vorderen Reihe einen solchen der hinteren deckt, wird für den Augenblick das Licht des hinteren hinweggenommen, weil es nicht zum Auge des Beobachters kommen kann, und eine solche Stelle scheint dem Beobachter deswegen nur halb so stark beleuchtet. als die benachbarten, wo die beiden Zähne ungestört nacheinander ihr Licht in das Auge senden. Somit erscheinen in dem hellen Scheine, den die Zahnreihen geben, diejenigen Stellen dunkler, wo bei der Bewegung der Räder je zwei Zähne zur Deckung kommen. Ist nun $\omega$ der Winkelabstand der Zähne, und gehen wir von einer Stellung der Räder aus, wo die Zähne sich decken, so wird eine zweite Deckung zustande kommen, wenn das eine Rad sich um $\frac{1}{2}\omega$ nach rechts, das andere um ebensoviel nach links gedreht hat. Die dunklen Streifen werden also nur den

[1] Roget in *Phil. Transact.* 1825. I. 131. Poggendorffs Ann. V. 93. Plateau ebenda XX. 319. Faraday ebenda XXII. 601. Emsmann ebenda LXIX. 326.

Winkelabstand $\frac{1}{2}\omega$ haben. und ihre Anzahl wird daher doppelt so goß sein, als die der Zähne. Das eine Rad kann man auch weglassen. wie Billet Sélis bemerkt, wenn man hinter das erste einen Hohlspiegel stellt, der ein mit dem Objekte zusammenfallendes aber verkehrtes Bild dieses Rades entwirft. Sehr hübsch läßt sich auch diese Methode anwenden, um die Art, wie sich ein Wasserstrahl in Tropfen auflöst. sichtbar zu machen.

Eine ähnliche Erscheinung beobachtete Emsmann an dem bekannten Abplattungsmodell, welches aus zwei elastischen Messingringen besteht, die zwei gegeneinander senkrechten Meridiankreisen der Erde entsprechen, und um die der Erdachse entsprechende Linie schnell gedreht werden, wobei sie durch die Zentrifugalkraft eine elliptische Gestalt annehmen. Da sie das Licht stark reflektieren, verbreiten sie bei schneller Rotation einen Lichtschein über die Kugelfläche, die sie beschreiben, und darin erscheinen dunkle Linien an den Stellen, wo bei der Rotation ein vorderes Bogenstück ein hinteres bedeckt. Das allgemeine Prinzip dieser Erscheinungen hat Plateau ausgesprochen. Wenn zwei erleuchtete Kurven sich durch das Gesichtsfeld so schnell bewegen, daß sie eine scheinbar kontinuierliche Beleuchtung der Fläche zurücklassen, so erscheint eine dunkle Linie in diesem lichten Felde, welche die Punkte verbindet, in denen sich nacheinander die Kurven geschnitten haben, vorausgesetzt, daß das Licht der einen Kurve die andere nicht durchdringen kann.

Die Dauer des Lichteindrucks wurde von Newton[1] gleich einer Sekunde geschätzt, später genau gemessen von Senger[2], der 30 Tertien, d'Arcy[3], der 8 Tertien, Cavallo[4], der 6 Tertien als längste Dauer des Eindrucks einer im Kreise geschwungenen glühenden Kohle fand. Parrot[5] fand, daß der Eindruck in einem hellen Zimmer kürzere Zeit währe, als in einem dunkeln. Daran schließen sich denn die späteren Messungen von Plateau[6] über die verschiedene Dauer der Eindrücke verschiedener Farben, und Emsmann[7].

Farbenkreisel erwähnt Musschenbroek[8], ohne einen älteren Beobachter zu nennen. Besondere Formen sind beschrieben durch E. G. Fischer[9], Lüdicke[10], Busolt[11].

Die fast gleichzeitige Erfindung der stroboskopischen Scheiben durch Plateau und Stampfer zu Ende des Jahres 1832 ist schon oben erwähnt. Die Konstruktion des Anorthoskops durch Plateau[12] fällt in den Januar 1836. Letzterer hat auch die Theorie der hierher gehörigen Erscheinungen vielfältig und ausführlich bearbeitet.

---

1704. I. Newton, *Optice.* Quaestio XVI.
1740. Segner, De raritate luminis. Gottingae 1740.
1760. Musschenbroek, Introductio ad philos. natur. § 1820.
1765. d'Arcy, *Sur la durée de la sensation de la vue. Mém. de l'Acad. des Sc.* 1765. p. 450.
1795. T. Cavallo, Naturlehre, übers. von Trommsdorf. III. 132.

---

[1] *Optice.* Quaestio XVI.
[2] De raritate luminis. Gott. 1740.
[3] *Mém. de Paris.* 1765. p. 450.
[4] Naturlehre übers. von Trommsdorf. III. 132.
[5] *Entretiens sur la Physique.* Dorpat 1819—24. III. 235.
[6] Poggendorffs Ann. XX. 304—324.
[7] Poggendorffs Ann. XCI. 611.
[8] Introd. ad philos. natur. § 1820.
[9] Lehrbuch der mechanischen Naturl. Berlin 1827. II. 267.
[10] Gilberts Ann. V. 272 und XXXIV. 4.
[11] Poggendorffs Ann. XXXII. 656.
[12] *Bull. de Brux.* 1836. III. 7. Derselbe in Poggendorffs Ann. XX. 319—543. XXXII. 646. XXXVII. 464. LXXVIII. 563. LXXIX. 269. LXXX. 150. 287.

1800. A F. Lüdicke, Beschreibung eines Schwungrades, die Verwandlung der Regenbogenfarben darzustellen. Gilberts Ann. V. 272.

1810. Derselbe, Versuche über die Mischung prismatischer Farben. Ebenda XXXIV. 4. Beschreibung eines Chromoskops. Ebenda XXXVI und LII.

1819. Parrot, *Entretiens sur la Physique.* Dorpat 1819—24. III. 235.

1825. Roget in *Philosophical Transact.* 1825. I. 131; Poggendorffs Ann. V. 93. (Radspeichenkurven.)

1827. E. G. Fischer, Lehrbuch der mechanischen Naturlehre. Berlin. II. 267. (Farbenkreisel.)
Paris, Thaumatrop. Poooendorffs Ann. X. 480; *Edinb. Journ. of Sc.* VII. 87.
Th. Young, Optische Erscheinung bei einer schwingenden Saite. Poggendorffs Ann. X. 470—480.

1829. Plateau in Pogoendorffs Ann. XX. 304—324; 543. (Verschiedene Dauer des Farbeneindrucks; Radspeichenkurven.) *Dissert. sur quelques propriétés des impressions produites par la lumières sur l'organe de vue.* Liège 1829.

1831. Faraday, *On a peculiar class of optical deceptions. Journ. of the Roy. Inst. I.;* Pogoendorffs Ann. XXII. 601. (Ein Zahnrad durch das andere gesehen; Schraubenbewegung.)

1833. Plateau, *Correspond. math. et phys. de l'observat. de Bruxelles.* VII. 365. Poggendorffs Ann. XXII. 647. (Phänakistoskop.) *Ann. de chim. et de phys.* LIII. 304.
Stampfer, Die stroboskopischen Scheiben oder optische Zauberscheiben, deren Theorie und wissensch. Anwendung. Wien; Poggendorffs Ann. XXIX. 189. XXXII.
636. Jahrbuch d. polytechn. Inst. zu Wien. Bd. XVIII.
Busolt, Farbenkreisel. Pogoendorffs Ann. XXXII. 656.

1834. Horner, Dädaleum. Poooendorffs Ann. XXXII. 650. *Phil. Mag.* (3) IV. 36.
Talbot, *Phil. Mag.* Nov. 1834. p. 327, und IV. 113. (Rotierende Scheiben zur Photometrie angewendet.)

1835. Plateau in: *Bull. de l'Acad. de Bruxelles.* 1835. p. 52. Poggendorffs Ann. XXXV. 457—464. (Messungen der Lichtstärke intermittierenden Lichts.)
Dove, Über Diskontinuität des Leuchtens der Blitze.
Addams, Optische Täuschung bei Betrachtung eines in Bewegung begriffenen Körpers. Poggendorffs Ann. XXXIV. 384; *Phil. Mag.* V. 373.

1836. Plateau, Anorthoskop. *Bull. de l'Acad. de Bruxelles.* III. 7 und 364. Poggendorffs Ann. XXXVII. 464.

1845. Emsmann, Optische Täuschung, welche sich an dem Abplattungsmodelle zeigt. Poooendorffs Ann. LXIV. 326.
Doppler in Abhandl. der böhmischen Ges. d. Wiss. V. Folge. Bd. 3.

1846. Dove, Über die Methoden aus Komplementärfarben Weiß darzustellen, und über die Erscheinungen, welche polarisiertes Licht zeigt, dessen Polarisationsebene gedreht wird. Berl. Monatsber. 1846. p. 70. Poggendorffs Ann. LXXI. 97; *Phil. Mag.* XXX. 465; *Inst.* Nr. 712. p. 176; *Arch. d. sc. ph. et nat.* V. 276.
Derselbe, Über ein optisches Verfahren die Umdrehungsgeschwindigkeit einer rotierenden Scheibe zu messen. Berl. Monatsber. 1847. p. 77. Poggendorffs Ann. LXXI. 112; *Inst.* Nr. 712. p. 177.
Müller, Anwendung der strobosk. Scheiben zur Versinnlichung der Wellenlehre. Poggendorffs Ann. LXVII. 271.

1849. Plateau, *Sur de nouvelles applications curieuses de la persistance des impressions de la rétine. Bull. de Brux.* XVI. I. 424, 588. II. 30, 254. *Inst.* XVII. Nr. 818. p. 277. Nr. 830. p. 378. XVIII. Nr. 835. p. 5. *Phil. Mag.* XXXVI. p 434, 436; Poggendorffs Ann. LXXVIII. 563. LXXIX. 269, LXXX. 150. 287; Froriep's Notizen X. 221, 325.

1850. J. Tyndall, *Phenomena of water jet.* (Beleuchtung durch elektrische Funken.) *Phil. Mag.* (4) I. 105; Poggendorffs Ann. LXXXII. 294; *Edinb. Journ.* L. 370; *Inst.* Nr. 924. p. 303.
H. Buff, Einige Bemerkungen über die Erscheinung der Auflösung des flüssigen Strahls in Tropfen. Liebio und Wöhler LXXVIII. 162. (Beleuchtung durch intermittierendes Licht.)
Billet Sélis, *Sur les moyens d'observer la constitution des veines liquides. Ann. d. chim. et de phys.* (3) XXXI. 326; Poggendorffs Ann. LXXXIII. 597.

1850. W. Swan, *On the gradual production of luminous impressions on the eye and other phaenomena of vision.* Silliman J. (2) IX. 443; *Proc. Edinb. Roy. Soc.* 1849. p. 230. Stevelly, *Attempt to explain the occasional distinct vision of rapidly revolving coloured sectors.* Silliman J. (2) X. 401; *Rep. of British Assoc.* 1850. 2. p. 21. Sinsteden, Eine optische Stelle aus den Alten. Poggendorffs Ann. LXXXIV. 448; *Cosmos.* I. 116.

1852. Montigny, *Procédé pour rendre perceptibles et pour compter les vibrations d'une tige élastique. Bull. de Brux.* XIX. 1. p. 227—250; *Inst.* 1852. p. 216—220, 268; Poggendorffs Ann. LXXXIX. 102—121.

1853. A. Poppe, Das verbesserte Interferenzoskop. Poggendorffs Ann. LXXXVIII. 223—230. (Beobachtung von Flüssigkeitswellen durch stroboskopische Scheiben.)
F. Uchatius, Apparat zur Darstellung beweglicher Bilder an der Wand. Wiener Ber. X. 482—485.
W. Rollmann, Über eine neue Anwendung der stroboskopischen Scheiben. Poggendorffs Ann. LXXXIX. 246—250.
J. Plateau, *Sur le passage de Lucrèce où l'on a vu une description du fantascope. Arch. d. sc. phys.* XX. 300—302; *Cosmos.* I. 307—309. (Gegen Sinsteden.)

1854. Emsmann, Über die Dauer des Lichteindrucks. Poggendorffs Ann. XCI. 611 bis 618; *Inst.* 1854. p. 276.

1855. Lissajous, *Note sur un moyen nouveau de mettre en évidence le mouvement vibratoire des corps. C. R.* XLI. 93—94; *Inst.* 1855. p. 245. *Cosmos.* VII. 81—83; *Arch. d. sc. phys.* XXX. 159—161.
Derselbe, *Note sur une méthode nouvelle applicable à l'étude des mouvements vibratoires. C. R.* XLI. 814—817; *Cosmos.* VII. 608—609; *Inst.* 1855. p. 402—403.

1856. Derselbe, *Mémoire sur l'étude optique des mouvements vibratoires. C. R.* XLIII. 973—976; XLIV. 727. XLV. 48—52; *Inst.* 1856. p. 411. 1857. p. 237; *Cosmos.* IX. 626—629. XI. 80—83, 110—112, 431—432; *Ann. d. chim. et de phys.* (3) LI 147—231.

*Nachtrag von Helmholtz aus der ersten Auflage.*

E. Brücke hat die Aufmerksamkeit darauf gelenkt, daß bei Scheiben, wie Fig. 40, S. 175, wenn sie mit einer gewissen Geschwindigkeit rotieren, die mittleren Ringe heller erscheinen, als die inneren oder äußeren, daß also bei einer gewissen Geschwindigkeit des Wechsels zwischen Weiß und Schwarz die Summe des Lichteindrucks nicht nur größer ist, als bei langsamerem Wechsel, wobei jede Farbe ungestört von der anderen für sich zur Erscheinung kommt, sondern auch größer als bei schnellerem Wechsel, wobei Weiß und Schwarz sich zu gleichmäßigem Grau vereinigen. Er fand, daß der Eindruck am stärksten war, wenn auf die Sekunde $17^1/_2$ Lichteindrücke kamen, und daß er etwa doppelt so viel brauchte, um ganz gleichmäßiges Grau zu sehen.

Blickte er nach einer Scheibe, in welcher statt der weißen Sektoren Öffnungen waren, mit einer roten Glasscheibe verdeckt, so wurde bei derjenigen Geschwindigkeit, welche die stärkste Lichtwirkung gab, das Rot gleichzeitig weißlicher, was Brücke von der Einmischung des auf S. 213 (Bd. II) erwähnten positiven komplementären Nachbildes des Rot ableiten zu können glaubt. Spektrales Grün wird unter denselben Umständen gelber, spektrales Blau nicht verändert.

Es handelt sich hierbei offenbar um eine komplizierte Wechselwirkung zwischen Erregung und Ermüdung der Netzhaut. So oft der Eindruck des Weiß beginnt, steigert sich anfangs die Erregung eine gewisse kurze Zeit bis zu einem Maximum, um nachher durch die allmählich zunehmende Ermüdung wieder abzunehmen. Ich bemerke dabei, daß ich mir Nachbilder von solchen

flimmernden rotierenden weißschwarzen Scheiben, sowohl ohne Einschaltung eines roten Glases, als mit einer solchen entwickelt habe, und daß der endliche nachdauernde Zustand der Ermüdung für alle Teile der Scheibe genau derselbe und in dem Nachbild keine Spur eines Unterschieds zwischen den flimmernden und nicht flimmernden Ringen zu sehen ist, obgleich andrerseits das Nachbild scharf genug war, daß ich den Rand der Scheibe und den kleinen Knopf, der das Ende der Achse blidete, sehr wohl darin erkennen konnte.

Nehmen wir nun an, daß nach dem Vorübergang jedes schwarzen Sektors dieser mittlere Zustand der Ermüdung wiederhergestellt sei, wie er schließlich im Nachbilde andauert, so werden die ersten Momente des eintretenden Weiß den stärksten Eindruck machen; wird der Eindruck dann abgebrochen, wenn er sein Maximum erreicht hat, so machen eben alle Sektoren der betreffenden Reihe diesen Maximaleindruck, während bei einer geringeren Zahl länger dauernder Eindrücke die Zahl dieser Maxima eine geringere ist und die Dauer des allmählich sich abschwächenden Eindrucks die Verminderung ihrer Anzahl nicht ersetzen kann. Ich möchte den Eindruck der flimmernden Ringe einer solchen Scheibe auf mein Auge auch nicht so beschreiben, daß ich sagte, der ganze flimmernde Ring zeige eine größere Helligkeit — denn der ganze Ring hat ja fortdauernd seine dunklen Stellen —; vielmehr erscheint das Weiß, soweit es sichtbar ist, auf den flimmernden Ringen verhältnismäßig am hellsten und reinsten, und es macht deshalb einen verhältnismäßig starken Eindruck auf das Auge. Der Eindruck eines hellen Lichts wird ja dadurch nicht aufgehoben, daß unmittelbar darauf Dunkel folgt.

Blickt man nun durch ein rotes Glas nach der rotierenden Scheibe, so erscheint auf den schwarzen Sektoren das komplementäre Blaugrün des Eigenlichtes der Netzhaut (siehe S. 205.) sehr deutlich, dasselbe was auch in dem schließlichen Nachbilde zurückbleibt. Auf den flimmernden Sektoren, wo das Rot im Maximum seiner Helligkeit und Reinheit erscheint, ist es allerdings auffallend, wie sich im Gegensatz dazu auch das komplementäre Blaugrün stärker der Aufmerksamkeit aufdrängt, so daß diese Ringe namentlich im indirekten Sehen geradezu bläulich auf dem roten Grunde der Scheibe erscheinen. Ich muß aber von Brückes Beschreibung darin abweichen, daß mir zwischen diesem flimmernden Blaugrün das Rot des Ringes gerade gesättigter und glänzender erscheint, als auf den anderen Ringen, wenn ich meine Aufmerksamkeit darauf richte. Es ist dies ein solcher Fall, wo man zwei Farben entgegengesetzter Art scheinbar an demselben Orte übereinander sieht, und es scheint mir, daß die abweichendste, wenn auch lichtschwächere, das Blaugrün, sich der Aufmerksamkeit am meisten aufdrängt. Indessen gebe ich zu, daß diese ganze Lehre von dem farbigen Abklingen farbigen Lichtes noch eine zu große Menge unerklärter komplizierter Erscheinungen enthält, als daß man jetzt schon die Erklärungen der Einzelheiten vollkommen feststellen könnte.

A. Fick hat die auf S. 176 erwähnten Versuche von Plateau wiederholt, und glaubt kleine Abweichungen von dem dort aufgestellten Gesetze gefunden zu haben, daß der Eindruck einer rotierenden Scheibe so ist, als wäre das Licht jedes Ringes gleichmäßig über den ganzen Ring ausgebreitet.

1858. D. Brewster, *On the duration of luminous impressions of certain points of the retina.* Athen. 1858. II, 521.
1860. W. Dove, Über einen besonderen Farbenkreisel des Herrn Lohmeier in Hamburg. Berl. Monatsber. 1860. S. 491. (Ist gleich dem Seite 185 beschriebenen Dädaleum.) Goodchild, Trocheidoskop. Dingler J. CLVII, 181—184. Pract. mechan. J. 1860. April 4. (Farbenscheiben für Kontrasterscheinungen benutzt.)
1862. F. Zöllner, Über eine neue Art anorthoskopischer Zerrbilder. Poggendorffs Ann. CXVII. 477—484.
J. J. Oppel, Vorläufige Notiz über eine eigentümliche Augentäuschung in Bezug auf Rotationsrichtungen. Jahresber. d. Frankf. Vereins. 1861—1862. S. 56—57.
D. Brewster, *On the compensation of impressions moving over the retina. Rep. of Brit. Assoc.* 1861 (2), p. 29.
1863. A. Fick, Über den zeitlichen Verlauf der Erregung in der Netzhaut. Reichert und du Bois Archiv. 1863. S. 739—764.
1864. E. Brücke, Über den Nutzeffekt intermittierender Netzhautreizungen. Wiener Ber. XLIX, 21. Jan. 1864.
Aubert, Physiologie der Netzhaut. Breslau. S. 96—103.

## § 23. Die Veränderungen der Reizbarkeit.*

Wir haben gesehen, daß nach der Einwirkung von Licht auf die Netzhaut der Zustand von Reizung im Sehnervenapparate noch eine Zeit lang anhält. Diese Nachdauer des Eindrucks nimmt man nach der Betrachtung heller Gegenstände am ungestörtesten wahr, wenn man das Auge auf ein ganz dunkles Gesichtsfeld richtet. Außerdem zeigt sich aber, daß nach Einwirkung hellen Lichts auf irgend eine Stelle der Netzhaut diese nun auch neu von außen einfallendes Licht in einer anderen Weise empfindet, als es die vorher nicht affizierten Teile der Netzhaut tun. Wir haben es also hier auch mit einer durch Einwirkung des Lichts veränderten Empfänglichkeit des Sehnervenapparates gegen äußere Reize zu tun.

Wir wollen im vorliegenden Paragraphen also hauptsächlich aufsuchen, welche Empfindungen entstehen, wenn die von vorausgegangenen hellen Lichte affizierte Partie der Netzhaut von anderem äußeren Lichte getroffen wird. Ich bemerke jedoch gleich, daß auch ein Teil der Erscheinungen hierhergezogen werden muß, welche im scheinbar dunkeln Gesichtsfelde erscheinen, weil es nämlich in Wirklichkeit kein absolut dunkles Gesichtsfeld gibt, vielmehr auch bei vollständigem Ausschluß alles äußeren Lichts doch immer noch eine gewisse schwache Reizung der Netzhaut durch innere Einflüsse bestehen bleibt, welche das schon im § 17 erwähnte Lichtchaos oder Eigenlicht des dunkeln Gesichtsfeldes hervorbringt. Die Reizempfänglichkeit der Netzhaut erscheint nun gegen diese inneren Reize in derselben Weise abgeändert, wie gegen objektives Licht, und es gehören deshalb zu unserem gegenwärtigen Gegenstande auch Erscheinungen, die im dunkeln Gesichtsfelde eintreten, nachdem der Zustand der Reizung der Netzhaut ganz aufgehört hat. Ich bemerke hierbei noch, daß in hellen Räumen der Schluß der Augenlider allein nicht hinreicht, das Gesichtsfeld von allem objektiven Lichte frei zu machen, wie man leicht an der weiteren Verdunkelung merkt, welche eintritt, wenn man die Augen nun zukneift

* Über die durch Adaptation für verschiedene Beleuchtungsintensitäten bewirkten längerdauernden Veränderungen der Reizbarkeit vergl. den Zusatz I am Schluß des Helmholtzschen Textes. N.

oder die Hand davor legt. Ja in direkter Sonnenbeleuchtung reicht es noch nicht einmal hin auch nur die Hand vorzulegen, weil auch durch diese noch eine wahrnehmbare Quantität roten Lichts hindurchdringt. Wenn also im folgenden von einem ganz dunkeln Gesichtsfelde die Rede ist, so ist darunter immer nur zu verstehen das Gesichtsfeld, wie es in einem absolut dunkeln, von allen Spuren objektiven Lichts geschützten Zimmer sich findet, oder wie es in einem hellen Zimmer entsteht, wenn man die Augen schließt, und jedes Auge dicht, aber ohne Druck mit einer Handfläche oder einem dunkeln undurchsichtigen Tuche bedeckt.

Ich werde ferner im folgenden dasjenige Licht, welches zuerst auf die Netzhaut eingewirkt und deren Reizempfänglichkeit verändert hat, das primäre Licht nennen, das später auf die veränderte Netzhautstelle einwirkende dagegen das reagierende Licht, weil es für uns gleichsam ein Reagens ist, durch welches wir die Reizbarkeit der Netzhaut prüfen.

Die Mannigfaltigkeit der Erscheinungen dieses Gebietes ist nun sehr groß, und obgleich eine ziemliche Anzahl ausgezeichneter Beobachter daran gearbeitet hat, ist es noch in vielen Teilen unsicher und lückenhaft. Die Schwierigkeit liegt darin, daß zuerst jeder Beobachter, der sich daran macht, eine gewisse Zeit braucht, um sich genügend zu üben, die hierher gehörigen Erscheinungen sicher aufzufassen und zu beurteilen, und dabei meistens diese Versuche schnell die Augen so angreifen, daß wenn man sie zulange fortsetzt, schwere und gefährliche Augen- und Nervenkrankheiten eintreten. Es haben deshalb die meisten Beobachter bisher nur eine verhältnismäßig geringe Menge von Tatsachen selbst bestätigen und neu entdecken können, und auch jedem künftigen Beobachter, welcher dergleichen Versuche machen will, ist anzuraten, an jedem einzelnen Tage nur sehr wenige Versuche dieser Art zu machen, und die Versuchsreihen für längere Zeit abzubrechen, sobald er bemerkt, daß nach den Versuchen oder überhaupt beim Ansehen hellen Lichts oder lebhafter Farben sich leichte Schmerzen in den Augen oder im Kopfe einstellen, oder wenn die Nachbilder anfangen lebhafter und dauernder zu werden, als sie im gesunden Auge sind.

Wir unterscheiden positive und negative Nachbilder in derselben Weise, wie man bei den Photographien von positiven und negativen Bildern redet. Positive Bilder sind solche, in denen die hellen Partien des Objekts ebenfalls hell, die dunkeln dunkel sind, negative Bilder dagegen solche, in denen die hellen Partien des Objekts dunkler, die dunkeln heller erscheinen.

Ich werde den Gang der Erscheinungen nun zunächst beschreiben, indem ich nur auf die Lichtstärke, nicht auf den Wechsel der Farben Rücksicht nehme, welcher den Wechsel der Helligkeit in den meisten Fällen begleitet, und seine Erklärung wahrscheinlich darin findet, daß für die verschiedenen Farben die Dauer der einzelnen Stadien der Erscheinung verschieden ist. Um den normalen Verlauf der Nachbilder ungestört zu beobachten, ist es notwendig, zunächst die Netzhaut von den Nachbildern der früheren Lichteindrücke zu befreien, wozu es gewöhnlich nötig ist und genügt, einige Minuten mit dicht bedeckten Augen zu sitzen, bis man im dunkeln Gesichtsfelde nichts mehr vor sich sieht, als das Lichtchaos, dessen eigentümliche Figuren (meist gleichsam helle Gerinnsel durch baumartig und netzförmig verteilte dunkle Streifen getrennt) man bald kennen lernt. Wenn man keine Bruchstücke von Zeichnungen äußerer Gegenstände mehr sieht, und auch beim Eindringen ganz schwachen Lichts durch die ge-

schlossenen Augenlider keine mehr sichtbar werden, ist das Auge vorbereitet, um den Eindruck zu empfangen.

Richtet man nun die Augen eine kurze Zeit auf einen hellen Gegenstand, z. B. die helle Fensterfläche, am besten so, daß man die Richtung der Augen unverändert läßt, und sie nur auf- und zudeckt, so bleibt unmittelbar hinterher ein positives Bild des primären hellen Objekts stehen, wie dies schon im vorigen Paragraphen besprochen ist. Dieses Bild ist desto schärfer und deutlicher, je weniger die Richtung der Augen verändert worden ist, und seine Helligkeit finde ich am größten, wenn die Bestrahlung der Netzhaut durch das primäre Licht etwa nur $^1/_3$ Sekunde gedauert hat. Die Erscheinungen des vorigen Paragraphen haben gelehrt, daß die Stärke der Reizung durch das Licht während der ersten Zeitmomente seiner Wirkung zunimmt, aber sie erreicht sehr schnell ihr Maximum. Dauert die Bestrahlung länger als $^1/_3$ Sekunde, so nimmt die Stärke des Nachbildes, welche der Intensität der zurückbleibenden Reizung der Sehnervensubstanz entspricht, schnell wieder ab, wovon wir den wahrscheinlichen Grund später nachweisen werden. Je größer übrigens die Intensität des primären Lichts ist, desto heller ist das positive Nachbild und desto länger dauert es. Dabei ist zu bemerken, daß im positiven Nachbilde oft auch Grade der Helligkeit unterscheidbar werden, welche beim direkten Anblick wegen zu großer Helligkeit nicht unterschieden wurden. Dreht man z. B. eine Lampe mit rundem Docht schnell aus, während man nach der erlöschenden Flamme hinblickt, so erkennt man im Nachbilde die größere Helligkeit der Ränder im Vergleich zur Mitte der Flamme, welche man (s. § 21) bei der direkten Betrachtung schwer bemerkt. Dieselbe Bemerkung machte auch Aubert bei den Nachbildern des elektrischen Funkens, welcher direkt gesehen als ein verwaschener Lichtstreif, im Nachbilde als eine scharf gezeichnete Linie erschien. Man kann übrigens auch von sehr mäßig erleuchteten Gegenständen, z. B. von weißem Papier, welches die zum Schreiben und Lesen bequeme Helligkeit hat, nach der beschriebenen Methode noch positive Nachbilder gewinnen, die eine erkennbare Dauer von etwa zwei Sekunden haben, während im Gegenteil das helle Nachbild der Sonne oft mehrere Minuten lang stehen bleibt.

Um die positiven Nachbilder recht schön zu haben, beachte man noch folgende Regeln. Während ihrer Erzeugung und ihrer Dauer muß man sorgfältig jede Bewegung des Auges und jede heftigere Bewegung des Körpers vermeiden, weil sie bei einer solchen stets für einige Zeit verschwinden. Nachdem man also genügende Zeit mit dicht bedeckten Augen gesessen hat, richte man unter den bedeckenden Händen die Augen nach der Richtung des Objekts und bemühe sich, sie ganz unverrückt zu halten, während man die Hände schnell wegzieht, und ebenso schnell wieder überdeckt. Diese Bewegung der Hände muß aber leise und leicht, ohne starke Anstrengung und Erschütterung des Körpers ausgeführt werden. Wenn man dies Verfahren gut eingeübt hat, so gelingt es zuweilen, das positive Nachbild unter den bedeckenden Händen so scharf und hell zu sehen, daß es den Eindruck macht, als wären die Hände durchsichtig, und man sähe die wirklichen Objekte. Man hat Zeit genug, an diesen Nachbildern noch eine Menge einzelner Umstände zu bemerken, auf welche zu achten man während der wirklichen Betrachtung nicht Zeit hatte. Die lichtschwachen Flächen verschwinden am schnellsten, ohne ihre Farbe wesentlich zu verändern, die helleren bleiben längere Zeit stehen, wobei ihre Farbe durch bläuliche Töne in ein violettes Rosa, später Gelbrot übergeht.

Zur Zeit, wo die helleren Stellen aus Blau in Violett übergehen, wird die Zeichnung des Nachbildes oft ziemlich undeutlich, weil, wie mir scheint, die hellen Teile dann verhältnismäßig mehr an Licht verloren haben als die schwächer beleuchteten, und beide in ihrer Beleuchtung sich ziemlich nahe gekommen sind, und weil wir überhaupt, wie im folgenden Paragraphen noch näher zu besprechen ist, nur wechselnde Erregungszustände der Netzhaut gut voneinander unterscheiden, für einen konstanten Erregungszustand aber schnell das Unterscheidungsvermögen verlieren. Später werden in den positiven Nachbildern die weniger hellen Gegenstände ganz dunkel und die helleren bleiben noch längere Zeit, jetzt rosa gefärbt, allein sichtbar. Sehr auffallend war es, wenn ich das Nachbild eines hellen Teppichs betrachtete, über welchen vom Fenster her ein Streifen Sonnenlicht fiel. Es trat eine Zeit ein, wo ich das Muster des Teppichs vollständig sah, aber überall gleich hell, so daß der Streifen Sonnenlicht sich nicht mehr bemerklich machte. Nachher verschwand das Muster des Teppichs, während die Figur des genannten helleren Streifens nun wieder in rosarotem Lichte erschien, und bis zuletzt stehen blieb. Es kann daher auch wohl bei bestimmten Beleuchtungsgraden die Zeichnung des Bildes ganz oder teilweise sehr undeutlich werden, und nachher wieder deutlicher, also scheinbar das Bild fast verschwinden und nachher sich wieder aufklären. Wenn man aber genau aufpaßt, wird man bemerken, daß der Grund des Bildes zur Zeit der Verwirrung der Zeichnung merklich heller ist, als wenn nachher die hellsten Stellen auf ganz schwarzem Grunde abgezeichnet wieder erscheinen. Es ist deshalb in solchen Fällen nicht der Lichteindruck verschwunden und wieder gekommen, sondern nur der Unterschied zwischen hellen und helleren Stellen für einige Zeit kleiner geworden, und die Fähigkeit ihn wahrzunehmen verschwunden, bis neuer Wechsel in Färbung und Helligkeit des Nachbildes diese wieder herstellen. Übrigens habe ich stets an Bildern, welche viele verschieden helle Objekte enthielten, gesehen, daß die einzelnen Objekte desto später aus dem positiven Bilde gänzlich verschwanden, je heller sie waren. Bei schwachen Nachbildern, wie diejenigen wohl waren, welche Aubert nach der Beleuchtung der Objekte durch den elektrischen Funken erhielt, hat dieser Beobachter jedoch gefunden, daß nach schwachen Funken die positiven Nachbilder länger dauerten, als nach starken Funken.

Hat man dagegen beim Auf- und Zudecken des Auges dieses kräftig bewegt, oder gedrückt, oder erschüttert, so sieht man im ersten Moment ein verwirrtes Lichtchaos, aus dem sich dann erst allmählich das Nachbild entwickelt. Ebenso wird das schon entwickelte Nachbild durch Bewegung, Erschütterung, Druck, äußeres Licht zeitweise oder ganz aufgehoben.

Wenn das äußere Licht nur sehr kurze Zeit eingewirkt hatte, nicht blendend war, und das Gesichtsfeld ganz frei von allen Spuren äußeren Lichts gehalten wird, verschwindet das positive Bild gewöhnlich, ohne in ein negatives überzugehen.* Wenn man aber, während das positive Nachbild noch besteht, oder auch etwas später, das Auge gegen gleichmäßig beleuchtete Flächen kehrt, oder auch nur mit geschlossenen Lidern sich nach einer hellen Umgebung wendet, erscheint ein negatives Nachbild. Je stärker das positive Nachbild ist, desto stärker muß auch das reagierende Licht gemacht werden, um es in ein negatives

* Über das sog. Purkinjesche Nachbild nach kurzdauernder Lichtreizung vergl. unter Zusatz I, B, 6. N.

Bild zu verwandeln. Es gibt immer eine gewisse Stärke des reagierenden Lichts, bei welcher das positive Bild einfach verschwindet, ohne negativ zu werden. Ist das reagierende Licht stärker, so entsteht ein negatives Bild, ist es schwächer, so bleibt das Bild positiv und wird nur undeutlicher. Mit wachsender Stärke des reagierenden Lichts wächst übrigens auch die Deutlichkeit des Nachbildes, bis jene Lichtstärke den Grad überschreitet, der für Erkennung von Differenzen der Lichtstärke um kleine Bruchteile am günstigsten ist, um dann wieder abzunehmen. Man kann somit auch Nachbilder erhalten von schwächerem primitiven Lichte auf stärkerem reagierenden, nur muß man auf sie gut aufpassen, weil sie sehr schnell vergehen. Auch nachdem das positive Bild geschwunden ist, bleibt auf hellen Flächen das negative Nachbild noch kurze Zeit sichtbar, indem es ebenfalls allmählich erblaßt und verschwindet, ja es kann sogar im ganz dunkeln Gesichtsfelde sichtbar werden, indem es hier als eine Verminderung der Helligkeit des Eigenlichts der Netzhaut erscheint. In der Regel erscheint dann dieses Eigenlicht selbst in der nächsten Umgebung des dunkeln Nachbildes durch Kontrast mit diesem etwas heller.

Größere Intensität des primären Lichts gibt dem negativen Nachbilde eine größere Deutlichkeit und Dauer. Auch unterscheiden sich im Nachbilde diejenigen Teile eines als primär beleuchtendes Objekt gebrauchten, blendend hellen Gegenstandes, welche eine objektiv verschiedene, für die Empfindung aber nicht verschiedene Lichtstärke haben. Ich habe oft gesehen, wenn ich nach der untergehenden Sonne geblickt hatte, daß Gegenstände, die einen Teil der Sonnenscheibe bedeckten, im negativen Nachbilde deutlich zu erkennen waren, von denen beim direkten Anblick der Sonne wegen der Irradiation keine Spur zu erkennen war. Selbst kleine Gegenstände, Zweige und Blätter von Bäumen können auf diese Weise nachträglich sichtbar werden. Die Reizempfänglichkeit derjenigen Netzhautteile, welche das Bild der Sonnenscheibe selbst aufgenommen haben, ist also nachher stärker verändert, als sie es in den Netzhautstellen ist, welche von den Zerstreuungskreisen und dem diffus verbreiteten Lichte getroffen waren, obgleich die ursprüngliche Empfindung beider sich nicht unterscheiden ließ. Eben deshalb sind Nachbilder der Sonne anfangs gewöhnlich größer als die Sonnenscheibe, und werden später kleiner, indem sich anfangs noch ein Nachbild der Zerstreuungskreise am äußeren Rande der Sonne hinzugesellt, welches aber schneller negativ wird und endlich früher schwindet als das der Mitte des Sonnenkörpers, wo die volle Helligkeit desselben eingewirkt hat.

Der Einfluß der Dauer der primären Bestrahlung ist für das negative Nachbild ein anderer als für das positive. Nämlich die Stärke des negativen Nachbildes nimmt zu mit der Dauer der Bestrahlung, und scheint sich erst bei längerer Dauer asymptotisch einem gewissen Maximum zu nähern. Durch lange Dauer sehr starker Bestrahlung kann sogar eine bleibende Veränderung der betreffenden Netzhautstelle entstehen, wie dies Ritter[1] erfuhr, als er 10 bis 20 Minuten lang direkt in die Sonne gesehen hatte. Zur Erzeugung deutlicher negativer Nachbilder ist es deshalb nützlich, die primäre Bestrahlung länger (bei mäßigem Licht etwa 5—10 Sekunden) dauern zu lassen. Dann ist das positive Nachbild schwach und schwindet schnell, das negative dagegen stärker und dauert länger. So z. B. schwindet nach der Betrachtung heller Wolken durch das Fenster von $^1/_3$ Sekunde Dauer das positive Nachbild nach etwa

[1] Beiträge zur näheren Kenntnis des Galvanismus. 1805. Bd. II. S. 175—181.

12 Sekunden, das negative auf hellerem Grunde nach etwa 24 Sekunden. Wenn ich dasselbe Objekt dagegen 4 oder 8 Sekunden betrachtete, schwand das negative Nachbild erst nach 8 Minuten. Ich hielt das Gesichtsfeld dabei ganz dunkel und ließ nur von Zeit zu Zeit schwaches Licht durch die geschlossenen Lider einfallen, um zu prüfen, ob das Nachbild noch da sei. Um das negative Nachbild recht scharf gezeichnet zu erhalten, ist es notwendig, während der Dauer der Bestrahlung scharf einen bestimmten Punkt des hellen Objekts zu fixieren. In dem negativen Nachbilde ist es noch besser als in dem flüchtigeren positiven möglich, nachträglich Einzelheiten zu erkennen, die man bei der direkten Beschauung nicht bemerkt hat. Hat man nacheinander zwei verschiedene Punkte des Objekts fixiert, so erkennt man auch nachher zwei sich teilweise deckende Nachbilder. So kann man auch im Nachbilde, wenn im Gesichtsfelde die Sonne steht, und man den Blick schnell über das Feld hinschweifen ließ, den ganzen Weg abgebildet erhalten, den das Sonnenbildchen auf der Netzhaut zurückgelegt hat. Hat man den Blick auf einzelnen Stellen des Feldes einen Augenblick festgehalten, so entsprechen diesen Punkten intensivere runde Nachbilder der Sonne, welche länger positiv bleiben, und wenn sie negativ geworden sind, dunkler werden und länger dauern. Diese sind verbunden durch schmalere verwaschene Streifen, welche anfangs zwar auch hell sind, sich aber bald negativ dunkler zeigen, und desto schwächer gezeichnet sind, je größer die Geschwindigkeit der Augenbewegung für die betreffende Stelle gewesen war. Diese Streifen sind schmaler als die Sonnenscheibe und am Rande verwaschen, weil über die ihrem Rande entsprechenden Netzhautteile nur eine Sehne des runden Sonnenbildes hingeglitten ist, über die mittleren dagegen ein Durchmesser; auf letztere also das Sonnenlicht länger gewirkt hat.

Positive wie negative Nachbilder bewegen sich, wenn das Auge bewegt wird. Ihre scheinbare Lage im Gesichtsfelde entspricht immer dem Orte, wo ein Objekt sich befinden müßte, dessen Bild auf die von dem primären Lichte getroffene Netzhautstelle fallen sollte. Ist also der gelbe Fleck von starkem Lichte getroffen worden, so befindet sich das Nachbild, wo man auch hinsehen möge, immer im Fixationspunkte des Auges und hindert, wenn es stark ist, feinere Gegenstände zu erkennen. Liegt ein kräftig gezeichnetes Nachbild dicht neben dem Fixationspunkte, so verleitet es den Beschauer leicht, es fixieren zu wollen, das Auge wendet sich nach dem Nachbilde hin, und dann fliegt dieses scheinbar immer vor dem Fixationspunkte her nach dem Rande des Gesichtsfeldes hin, ähnlich den fliegenden Mücken. Fixiert der Beschauer aber einen äußeren festen Punkt, so stehen auch die Nachbilder still. Ihre Bewegung hängt immer nur von Bewegung des Auges ab.

Wenn wir nun aus den bisher beschriebenen Erscheinungen Schlüsse auf den Zustand der Netzhautstelle und des zugehörigen Teiles des Sehnervenapparats ziehen, welche von dem primären Lichte erregt werden waren, so finden wir, daß in ihnen erstens nach Erlöschen des primären Lichtes der Reizungszustand noch eine Zeitlang dauert, was durch die positiven Nachbilder angezeigt wird, und daß zweitens die betreffende Nervensubstanz neu einfallendes, reagierendes Licht schwächer empfindet, als die früher von Licht nicht getroffenen übrigen Netzhautstellen. Nach der Einwirkung von Licht besteht also erstens Reizung fort, zweitens ist die Empfänglichkeit für neue Reize vermindert. Daß Reizung einen Zustand verminderter Reizempfänglichkeit zurück-

läßt, findet auch bei den motorischen und anderen empfindenden Nerven statt. Wir nennen einen solchen Zustand Ermüdung.*

Aus dem Umstande, daß die negativen Nachbilder bei steigender Helligkeit des reagierenden Lichtes so lange deutlicher werden, bis diese Helligkeit etwa den Grad erreicht hat, wo Verminderung der Lichtstärke um kleine Bruchteile ihrer ganzen Größe am besten wahrgenommen wird, können wir schließen, daß die Ermüdung der Sehnervensubstanz die Empfindung neu einfallenden Lichts ungefähr in dem Verhältnis beeinträchtigt, als wäre die objektive Intensität dieses Lichts um einen bestimmten Bruchteil ihrer Größe vermindert. Es soll, bei dem Mangel genügender Messungen, hierdurch nur der Gang im allgemeinen bezeichnet werden, welchen die Intensität der Empfindung einer ermüdeten Netzhautstelle als Funktion der Intensität des reagierenden Lichtes einhält. Solange noch neben dem negativen Bilde das positive besteht, ist die Reizung der Netzhaut zusammengesetzt aus der noch fortbestehenden Reizung, welche das primäre Licht hervorgebracht hat, und der durch die Ermüdung verminderten Reizung durch das reagierende Licht, und in diesem Sinne können wir die Helligkeit des Nachbildes als die Summe der Helligkeit des positiven Bildes und der durch die Ermüdung verminderten Helligkeit des reagierenden Lichts betrachten. Ist nun die Verminderung der Helligkeit des reagierenden Lichts größer als die Helligkeit des positiven Bildes, so wird die ganze Helligkeit des Nachbildes geringer sein, als die Helligkeit des reagierenden Lichtes, wie sie den nicht ermüdeten Netzhautstellen erscheint, das Nachbild also negativ werden. Dies ist bei größerer Helligkeit des reagierenden Lichtes der Fall. Bei geringerer dagegen ist die Helligkeit des positiven Bildes mehr als hinreichend, den Verlust durch die Ermüdung zu decken, das Bild ist positiv.

Es sei $H$ die scheinbare Helligkeit des reagierenden Lichts in den nicht ermüdeten Netzhautstellen, $\alpha H$ in den ermüdeten, wo $\alpha < 1$, und $I$ die scheinbare Helligkeit des positiven Bildes, so muß nach dem oben Gesagten bei wechselnder Größe von $H\,\alpha$ ziemlich konstant sein. Nehmen wir dies an, so ist $\alpha H + I$ die Helligkeit des Nachbildes, $H$ die des Grundes, auf welchem es erscheint. Für

$$H = \frac{I}{1 - \alpha}$$

wird

$$1 + \alpha H = H$$

das Nachbild so hell, wie der Grund, es wird unsichtbar. Für

$$H > \frac{I}{1 - \alpha}$$

wird

$$I + \alpha H < H$$

das Nachbild negativ, umgekehrt für

$$H < \frac{I}{1 - \alpha}$$

wird das Nachbild positiv. Ist $I$ sehr klein, so kann schon die scheinbare Helligkeit des Eigenlichts der Netzhaut größer sein als $\frac{I}{1 - \alpha}$, dann wird das

* Bezüglich neuerer Untersuchungen über die Empfindlichkeit der Netzhaut durch „Adaptation“ für Dunkel oder Helligkeit vergleiche unter Zusatz I A. N.

negative Bild auch im dunkelsten Gesichtsfelde erscheinen. Ist endlich das positive Bild ganz geschwunden, so ist $H$ die Helligkeit im Grunde und $\alpha H$ im Nachbilde. Ist $1 - \alpha$ bei schwindender Ermüdung sehr klein geworden, so wird eine gewisse mittlere Stärke des reagierenden Lichts nötig sein, um den Unterschied erkennen zu lassen. Im dunkeln Gesichtsfelde wird es dann nicht zu sehen sein. Endlich wird $1 - \alpha = 0$ und das Nachbild schwindet ganz.

Was die negativen Bilder im ganz verdunkelten Gesichtsfelde betrifft, so lehrt der Augenschein, daß sie durch Verringerung des Eigenlichts der Netzhaut zustande kommen. Dieses Eigenlicht also, welches wir aus der Wirkung innerer Reize auf den Sehnervenapparat herleiten müssen, unterliegt den Wirkungen der Ermüdung ebenso wie der Eindruck des äußeren Lichts. Daß Ermüdung des Auges durch Reizung seine Empfänglichkeit für andere Reize beeinträchtigt, läßt sich übrigens auch für elektrische und mechanische Reize der Netzhaut nachweisen. Wenn man ein negatives Nachbild im Auge entwickelt hat, und läßt einen elektrischen Strom aufsteigend durch Auge und Sehnerven gehen, wobei die helle bläuliche Erleuchtung des Gesichtsfeldes eintritt, so wird das negative Nachbild dadurch verstärkt, und wenn ein Bild gerade im Übergang von positiv zu negativ ist, kann man es durch einen aufsteigenden Strom negativ, durch einen absteigenden positiv machen. Das für Licht ermüdete Auge empfindet also auch den elektrischen Reiz schwächer. Hat man durch gleichmäßig anhaltenden Druck Farbenerscheinungen im Auge entwickelt, und läßt mit dem Drucke nach, so kann man die noch bestehenden Bilder im dunkeln Gesichtsfelde negativ machen, indem man Licht durch die geschlossenen Augenlider einfallen läßt, oder nach einer beleuchteten Fläche hinblickt. Die Ermüdung durch Druckreiz macht also das Auge auch gegen Lichtreiz unempfindlicher.

In solchen Fällen, wo man ein schwindendes Nachbild durch reagierendes Licht für einen Augenblick sichtbar gemacht hat, sieht man zuweilen unmittelbar nachher im dunkeln Gesichtsfelde wieder ein schwaches positives Nachbild. Daraus ist zu schließen, daß in der ermüdeten Netzhautstelle die Reizung durch reagierendes Licht zwar schwächer ist als in den nicht ermüdeten Teilen, aber länger nachdauert, welcher Umstand übrigens ebenfalls bei den motorischen Nerven seine Analogie findet, da die Zuckung eines ermüdeten Muskels zwar weniger kräftig ist, aber länger dauert, als die eines nicht ermüdeten. Dieser Wechsel zwischen positiven und negativen Bildern, welcher zuweilen bei wenig auffallenden Änderungen der Beleuchtung durch Zukneifen der Augenlider, Bewegungen des Augapfels unter den geschlossenen Lidern, auch wohl nach subjektiven Lichterscheinungen durch plötzlichen Druck auf den Augapfel eintreten kann, hat einige Beobachter, namentlich Plateau, veranlaßt, einen spontanen Wechsel der Zustände des Nervenapparats während der Dauer der Nachwirkung anzunehmen. Ich selbst kann in dieser Beziehung nur Fechner beistimmen, daß in den meisten Fällen Wechsel der Beleuchtung, Bewegungen des Auges oder des Körpers usw. Veranlassung zu diesem Wechsel geben. Aber natürlich kann zu einer Zeit, wo sich zwei entgegengesetzte Einflüsse gerade im Gleichgewichte halten, der kleinste Nebenumstand nach der einen oder anderen Seite einen Ausschlag geben. Ich erinnere daran, daß selbst die Atembewegungen auf das Eigenlicht der Netzhaut einwirken. Zuweilen schwinden auch die Bilder nur, ohne sich in die entgegengesetzten zu verwandeln, und zwar, wie Aubert es passend bezeichnet, so als wenn eine nasse Stelle auf einem er-

wärmten Bleche schwindet. Übrigens verschwinden auch schwache objektive Bilder zuweilen in ähnlicher Weise, wenn man starr einen Punkt fixiert, z. B. eine Landschaft in der Nacht betrachtet. Es macht mir den Eindruck, als ob die Vergleichung der Erregungsstärke verschiedener Netzhautteile aufhörte möglich zu sein, wenn die Erregung nicht von Zeit zu Zeit wechselt. Bei objektiven Bildern ist dies jederzeit zu bewerkstelligen, dadurch, daß man den Fixationspunkt wechselt, bei subjektiven aber nicht. Wir kommen in der Lehre vom Kontraste darauf noch wieder zurück. Ich finde übrigens, daß, wenn man bei möglichst unverrückt gehaltenem Auge dergleichen Bilder aufmerksam festzuhalten sucht, das Gefühl der Anstrengung gerade dann am größten ist, wenn die Bilder so hinschwinden. Dann folgt nach einiger Zeit ein Nachlaß dieser Anstrengung, wobei die Bilder wiederkommen. Welche innere Veränderung dem entspricht, weiß ich nicht anzugeben.

Hierher gehören weiter folgende Erscheinungen, die sich aus den angegebenen Prinzipien erklären.

Wenn man auf grauem Grunde einen hellen Gegenstand, z. B. ein weißes Stück Papier, betrachtet, und dieses plötzlich entfernt, während man die Richtung des Auges unverändert läßt, so erscheint ein dunkleres Nachbild des weißen Papiers, wie in den bisher beschriebenen Fällen. Betrachtet man auf dem grauen Grunde dagegen ein Stückchen schwarzen Papiers, und zieht dies weg, so erscheint ein helles Nachbild. Die von dem Bilde des weißen Papiers getroffene Stelle der Netzhaut ist mehr ermüdet, die von dem schwarzen Bilde getroffene weniger ermüdet, als der Rest der Netzhaut, auf welchem der graue Grund sich abbildete. Indem nachher die ganze Netzhaut gleichmäßig von dem Lichte des grauen Grundes getroffen wird, wirkt dieses Licht am stärksten auf den Teil der Netzhaut, der primär schwarz sah, schwächer auf den, der vorher grau sah, am schwächsten auf den, der weiß sah. Der Versuch, bei dem wir das schwarze Papier betrachten und dann wegziehen, ist nun deshalb wichtig, weil er zeigt, daß bei längerer Betrachtung des grauen Grundes Ermüdung der von seinem Lichte getroffenen Netzhaut eintritt, und dieses Licht deshalb immer schwächer und schwächer empfunden wird. Wenn wir nämlich das schwarze Papier wegziehen, trifft das Licht des grauen Grundes eine nicht ermüdete Stelle der Netzhaut, und macht auf diese eben denselben Eindruck, den zu Anfang des Versuchs das Grau des Grundes gemacht hat. Dieses hat aber inzwischen die Teile der Netzhaut, die es trifft, ermüdet, und erscheint viel dunkler, wenn wir es mit dem frischen Eindrucke auf den unermüdeten Netzhautstellen vergleichen. Es unterscheidet sich dieser Versuch von den früheren dadurch, daß das primäre und das reagierende Licht dasselbe ist, nämlich das Licht des grauen Grundes. Wir erkennen daraus, daß äußeres Licht von konstanter Stärke, welches längere Zeit ununterbrochen auf die Netzhaut einwirkt, eine immer schwächer und schwächer werdende Erregung derselben hervorbringt. Ja die Erregungsstärke kann, namentlich bei sehr schwachem Lichte, so abnehmen, daß sie überhaupt nicht mehr wahrgenommen wird. Wenn man bei hereinsinkender Nacht irgend einen schwach erkennbaren Gegenstand anhaltend fixiert, ohne die Richtung des Auges zu verändern, verschwindet derselbe bald vollständig, und erst indem man die Richtung des Blicks verändert, pflegt das Objekt wieder im negativen Nachbilde aufzutauchen. Namentlich am Seehorizonte ist diese Erscheinung sehr auffallend, wenn man bei beginnender Dunkelheit sich bestrebt, ihn zu durch-

mustern, weil hier die Nachbilder jedes Teiles des Horizonts jedem anderen Teile kongruent sind, und welche Stelle man auch fixieren mag, das Nachbild des dunkleren Meeres auf Meer, des helleren Himmels auf Himmel fällt. Richtet man den Blick dann etwas höher, so erscheint am unteren Teile des Himmels ein hellerer Streif, der unten begrenzt ist durch die jetzt wieder sichtbar werdende Grenze des Meeres, oben durch eine dieser parallel fortlaufende Linie, die durch den neuen Fixationspunkt geht. Dieser Streif ist das negative Nachbild des Meeres, auf den Himmel projiziert. Richtet man den Blick umgekehrt tiefer, so erscheint ein schwarzer Streif, das negative Nachbild des Himmels auf dem Meere, nach oben begrenzt durch den Horizont des Meeres, nach unten durch eine damit parallele Linie. So kann der Horizont im indirekten Sehen sichtbar werden, aber er verschwindet immer wieder, wenn man ihn direkt zu fixieren sucht.

Ähnliche Erscheinungen treten auch ein, wenn man ein weißes oder schwarzes Quadrat auf grauem Grunde fixiert, und den Fixationspunkt ein wenig verändert. Dann deckt das Nachbild des Papiers nicht vollständig das Papier selbst und die Ränder verändern ihre Helligkeit. Wo das Nachbild des weißen Papiers auf den grauen Grund zu liegen kommt, erscheint dieser dunkler; wo das Nachbild des grauen Grundes sich über das weiße Papier hinschiebt, erscheint dieses heller. Beim schwarzen Papier ist es umgekehrt. Hat man den Blick eine Zeitlang genau an einem bestimmten Punkte des Papiers festgehalten und richtet ihn plötzlich auf einen anderen benachbarten Punkt, so sind auch die Ränder des Nachbildes scharf gezeichnet, und der wahre Sachverhalt ist leicht zu erkennen. Wenn man dagegen fortdauernd mit dem Fixationspunkte geschwankt hat, so sind die Nachbilder schlecht begrenzt, und es erscheint dann der helle Grund in der Nähe des weißen Papiers nur verwaschen dunkler schattiert, und der Rand des weißen Papiers ebenso hell schattiert. Ähnliches geschieht, wenn man eine Zeitlang ein weißes Quadrat auf dunklem Grunde betrachtet hat und, ohne den Fixationspunkt zu verändern, das Auge plötzlich dem Objekt näher bringt, so daß die scheinbare Größe des letzteren wächst. Dann erscheint der Rand des Quadrats, soweit er jetzt nicht mehr von dem Nachbilde des früher gesehenen Bildes gedeckt wird, hell aufzublitzen. Entfernt man dagegen das Auge plötzlich, nachdem man das Quadrat längere Zeit fixiert hat, so erscheint es auf dem dunkeln Grunde von einem dunkleren Rahmen umgeben.

Für die Seitenteile der Netzhaut haben Purkinje und Aubert bemerkt, daß der Eindruck heller Objekte auf ihnen viel leichter schwindet, als im Zentrum. Die Ermüdung scheint dort also viel schneller einzutreten. Für die negativen Nachbilder auf den Seitenteilen hat Aubert gefunden, daß sie weniger intensiv sind, als die zentralen, übrigens sich im wesentlichen ähnlich verhalten. Außerdem, finde ich, werden sie viel leichter übersehen als die zentralen Nachbilder, selbst auf hellen Flächen, und nur beim Wechsel der Beleuchtungsstärke bemerkt man sie leicht.

Wir gehen jetzt über zu den Farbenerscheinungen der Nachbilder. Wenn man farbige Objekte betrachtet hat, und die Nachbilder auf ganz dunklem oder weißem Grunde von verschiedener Helligkeit betrachtet, so entsteht je nach Umständen ein positives oder negatives Bild. Das positive Bild ist im Anfang in den Stadien seiner größten Helligkeit gleich gefärbt mit dem Objekt, und das negative Bild ist, wenigstens sobald es vollständig und kräftig entwickelt

ist, komplementär zu dem Objekte gefärbt. Der Übergang von dem positiven zu dem negativen Bilde geschieht indessen gewöhnlich so, daß sich weißliche oder graue Farbentöne anderer Art dazwischenschieben, und zwar ist die Ordnung dieser Farben in der Regel dieselbe, gleichviel ob der Übergang durch allmähliches Nachlassen der Reizung oder durch Steigerung der Helligkeit des Grundes geschieht.

Die positiven Bilder entwickelt man am besten durch momentane Wirkung des primären Lichts. Hat man dabei verschieden gefärbte Objekte vor sich, so zeigt das zurückbleibende positive Nachbild im Anfange die Objekte genau in ihren natürlichen Farben. Ehe das Nachbild verschwindet, ergießt sich darüber meistens ein rosenroter Schein, in welchem die früheren Farbenunterschiede fast ganz verschwinden, dann folgen schwach gefärbte gelblich-graue Töne, in denen das positive Bild schwindet, oder in ein schwach gezeichnetes negatives Nachbild übergeht.

Die negativen Nachbilder erhält man besser nach längerer Fixation des Objekts. Um sie zu sehen, lege man farbige Papiere auf einen grauen Grund, fixiere einen bestimmten Punkt des farbigen Papiers und ziehe es plötzlich weg. Dann erscheint auf dem grauen Grunde ein scharf gezeichnetes negatives Nachbild von komplementärer Färbung. So ist z. B. das Nachbild von Rot blaugrün, von Gelb blau, von Grün rosarot, und umgekehrt. Über die Dauer und Stärke dieser Nachbilder gilt im allgemeinen dasselbe, was vorher über die Nachbilder weißer Objekte gesagt worden ist.

Das Auge also, welches z. B. Gelb gesehen hat, befindet sich nachher in einem Zustande, wo die blauen Teile des weißen Lichts es stärker affizieren, als die gelben Teile. Die Ermüdung der Netzhaut erstreckt ihre Wirkung demnach nicht gleichmäßig auf jede Art von Reizung, sondern hauptsächlich auf eine solche Reizung, welche der primären ähnlich ist. Sehr einfach wird dieser Umstand aus Th. Youngs Annahme dreier für die verschiedenen Farben verschieden empfindlichen Nervenarten erklärt. Denn da das farbige Licht diese drei Arten von Nerven nicht gleich stark erregt, so müssen den verschiedenen Graden der Erregung auch verschiedene Grade der Ermüdung nachfolgen. Hat das Auge Rot gesehen, so sind die rotempfindenden Nerven stark gereizt und sehr ermüdet, die grünempfindenden und violettempfindenden schwach gereizt und wenig ermüdet. Fällt nachher weißes Licht in das Auge, so werden die grün- und violettempfindenden Nerven davon verhältnismäßig stärker affiziert werden, als die rotempfindenden. Der Eindruck des Blaugrün, der Komplementärfarbe des Rot, wird deshalb in der Empfindung überwiegen.

Entsprechend verhält es sich, wenn man negative Nachbilder von farbigen Objekten auf farbigem Grunde betrachtet. Aus der Farbe des Grundes schwinden immer hauptsächlich diejenigen Bestandteile, welche in der primär angeschauten Farbe überwiegen. So läßt ein grünes Objekt auf gelbem Grunde ein rotgelbes Nachbild, auf blauem Grunde ein violettes. Denken wir uns das Gelb aus Rot und Grün, das Blau aus Grün und Violett zusammengesetzt, dann das Grün in beiden durch Einfluß der Ermüdung vermindert, so ergibt sich der Erfolg, daß das Nachbild im Gelb sich dem Rot, im Blau dem Violett nähern wird. Überhaupt liegt die Farbe des Nachbildes immer zwischen der des Grundes und der Komplementärfarbe des Objekts, und kann, soweit es nur den Farbenton, nicht die Helligkeit betrifft, als eine Mischung von beiden angesehen werden.

Von besonderem Interesse sind die Fälle, wo die Farbe des Objekts der des Grundes gleich oder komplementär ist. Um Beobachtungen über den ersteren Fall zu machen, tut man am besten, ein schwarzes Objekt auf einen farbigen Grund zu legen, und nachdem man einen Punkt seines Randes eine Weile fixiert hat, es plötzlich hinwegzuziehen. Unter diesen Umständen ist der neben dem Schwarz sichtbare Teil des Grundes als das primäre farbige Objekt zu betrachten, der ganze farbige Grund nach Entfernung des schwarzen Objekts als das reagierende Licht. Man sieht alsdann ein helles Nachbild des schwarzen Objekts, in welchem die Farbe des Grundes nicht bloß lichtstärker, sondern auch gesättigter ist, als im Rest des Grundes, so daß sie auf dem letzteren mit vielem Grau gemischt zu sein scheint. Bei einiger Aufmerksamkeit erkennt man das Dunkel- und Grauwerden des farbigen Grundes auch wohl, ehe man das schwarze Objekt wegnimmt. Recht auffallend wird es im letzteren Momente, weil nun an dieser Stelle die Farbe in der Weise sichtbar wird, wie sie im ersten Augenblicke des Beschauens das unermüdete Auge affiziert. Dieses Grauwerden des Grundes findet sich nicht bloß bei gemischten weißlichen Farben, bei welchen es so stark werden kann, daß der Farbenton des Grundes ganz verschwindet, sondern selbst bei den homogenen Farben des Spektrums und gewisser farbiger Gläser, nachdem man auf das sorgfältigste alles fremde weiße Licht ausgeschlossen hat. Wenn man z. B. ein mit Kupferoxydul rot gefärbtes Glas, welches nur rote Strahlen hindurchläßt, vor die Augen nimmt, den Kopf und die Ränder des Glases mit einem dunkeln Tuche umhüllt, so daß nur rotes Licht zu den Augen dringen kann, dann durch das Glas nach einer weißen Fläche sieht, und vor diese ein schwarzes Objekt bringt, welches man plötzlich entfernt, so sieht man den Gegensatz zwischen dem rotgrauen Grunde und dem gesättigten Rot des Nachbildes ganz deutlich. Die Erklärung dieser Erscheinung liegt offenbar darin, daß während des Anschauens der roten Farbe des Grundes die betreffenden Teile der Netzhaut für Rot ermüden, und es deshalb schwächer empfinden, als die unermüdeten Teile, auf welche das Bild des schwarzen Objekts gefallen war. Ist das Rot auch noch mit Weiß gemischt, so nimmt die Empfindlichkeit für das Rot in einem stärkeren Verhältnisse ab, als für die übrigen Farben, die in dem beigemischten Weiß enthalten sind, und die Farbe muß deshalb durch die Ermüdung der Netzhaut verhältnismäßig weißlicher werden; da sie aber auch gleichzeitig lichtschwächer wird, erscheint sie grau. Dasselbe geschieht nun aber nicht bloß mit weißlichem Rot, sondern auch mit ganz reinem Rot, und hier wird die Erklärung zweifelhafter. Man könnte erstens an den Lichtnebel des dunkeln Gesichtsfeldes denken. Wenn man während der Zeit, wo das Nachbild im Auge entwickelt ist, das Auge schließt und vollständig verdunkelt, so sieht man in dem Lichtnebel ein deutlich gezeichnetes komplementär gefärbtes Nachbild des Grundes, in unserem Falle blaugrün. Die inneren Reize, welche die Empfindung des Lichtnebels bewirken, bringen in der für Rot ermüdeten Stelle der Netzhaut, ebenso wie weißes objektives Licht, nur die Empfindung des Blaugrün hervor. Wird diese Empfindung nun zusammengesetzt mit der von objektivem Rot, so muß daraus ein weißliches (oder graues) Rot hervorgehen, wie es in dem Versuche beobachtet wird.

Indessen scheint mir diese Erklärung nicht zu genügen, da die scheinbare Lichtintensität des Lichtnebels vor geschlossenen Augen doch nur sehr gering erscheint. Es ist allerdings schwer, ein bestimmtes Maß dafür anzugeben.

Das Grauwerden des Rot kann aber auch an sehr hellem rein roten Lichte beobachtet werden, z. B. an weiß von der Sonne beleuchteten Wolken, die man durch ein rotes Glas betrachtet. In diesem Falle würde Th. Youngs Hypothese die Erklärung geben. Ich habe oben schon auseinandergesetzt, daß wir dabei die Annahme machen müßten, daß die Spektralfarben stark zwar nur eine oder zwei Nervenarten erregten, schwach aber auch die anderen. Es war diese Modifikation der Annahme nötig, um die Veränderung des Farbentons reiner Spektralfarben bei großer Lichtintensität, und die Resultate der Mischung von Spektralfarben zu erklären. Dieselbe Annahme würde ersichtlich auch geeignet sein, das vorliegende Phänomen zu erklären. Wenn das reine rote Licht zwar die rotempfindenden Nerven überwiegend stark, schwach aber auch die anderen erregt, und die Empfindlichkeit jener ersten durch die starke Erregung schneller abnimmt, als die der letzteren, so muß der Farbeneindruck sich weißlichem oder grauem Rot nähern.

Wenn die primäre Farbe komplementär zu der reagierenden Farbe des Grundes ist, so erscheint die letztere in der Ausdehnung des Nachbildes gesättigter als auf den nicht ermüdeten oder durch die Farbe des Grundes ermüdeten Teilen der Netzhaut. Wenn man auf einen roten Grund ein blaugrünes Objekt legt, und nachdem man es eine Weile fixiert hat, es wegzieht, so erscheint ein gesättigt rotes Nachbild, ähnlich als hätte man ein schwarzes Objekt weggenommen. Man kann sich aber leicht überzeugen, daß die Farbe im Nachbilde eines komplementären Objekts noch gesättigter ist, als im Nachbilde eines schwarzen Körpers. Am einfachsten ist es, sich ein Objekt zu verfertigen, von dem ein Teil schwarz, ein anderer farbig, z. B. blaugrün ist, dies auf einen komplementären (roten) Grund zu legen, und einen Punkt des Grundes dicht an der Grenze des Schwarz und Blaugrün zu fixieren. Nimmt man das Objekt dann weg, so erscheint in dem ganzen Nachbild die Farbe des Grundes klarer als in dem vorher unbedeckten Teile des Grundes. Das Nachbild des Blaugrün ist etwas dunkler als das des Schwarz, aber es ist nicht das Rot, welches dort lichtschwächer wäre, vielmehr erscheint das Rot im Nachbilde des Schwarz wie von einem weißlichen Nebel übergossen, welcher im Nachbilde des Blaugrün das Rot freiläßt. Es erscheint also das Nachbild des Rot auf Rot graurot, des Schwarz auf Rot weißrot, des Blaugrün auf Rot gesättigt rot. Man sieht diese Unterschiede sehr gut, wenn man bei diesem Versuch alle drei Nuancen nebeneinander hat.

Setzt man voraus, daß das Rot des Grundes noch Weiß enthält, so erklärt sich der Erfolg leicht. Schwarz ermüdet das Auge gar nicht, es empfindet im Nachbilde unverändert das weißliche Rot des Grundes. Rot ermüdet das Auge für Rot, es empfindet im Nachbilde das Rot noch schwächer, die übrigen Bestandteile des Weiß ziemlich ungeschwächt, die Empfindung ist die von lichtschwachem weißlichen Rot (Graurot). Das Blaugrün macht dagegen das Auge unempfindlicher für die dem Rot fremdartigen Teile in dem Lichte des Grundes, und läßt also das Rot im Nachbilde freier von fremden Beimengungen heraustreten.

Dieselben Versuche gelingen nun aber ebensogut mit reinen Spektralfarben. Ich habe im Felde eines Fernrohrs mir einzelne Teile des Spektrums hergestellt mit allen Vorsichtsmaßregeln, welche nötig sind, um die letzten Reste weißen Lichts zu entfernen. Der Grund war so tiefschwarz, daß man die Blendung des Fernrohrs auf ihm nicht mehr erkennen konnte, vielmehr die

wolkigen Figuren des inneren Lichtnebels auf ihm sah. Das Auge wurde von keinem anderen Lichte, als dem eines kleinen Teils des Spektrums getroffen. Auf dieses farbige Feld warf ich nun Nachbilder von komplementären Spektralfarben. Zu dem Ende war vor das Okular unter 45° ein kleines bewegliches Stahlspiegelchen gestellt, in welchem man gespiegelt einen passend abgeblendeten Teil eines anderen sehr hellen Spektrums sah, durch eine kreisförmige Blendung abgegrenzt. Für dieses zweite Spektrum ist ein so hoher Grad von Reinheit nicht erforderlich. Die Anordnungen waren so getroffen, daß der ganze Kreis in der gleichen Farbe erschien. Sobald man das Spiegelchen vor dem Okular fortzog, sah der Beobachter statt des bisher durch Reflexion gesehenen Kreises durch das Fernrohr auf das reine Spektrum. Auf diesem erschien das Nachbild des farbigen Kreises. Es traten hier genau dieselben Erfolge ein, wie bei den ähnlichen Versuchen mit Pigmentfarben. Namentlich erschien das Nachbild der Komplementärfarben als eine gesättigtere Farbe im Vergleich mit der Farbe des Grundes. Der letztere schien wieder mit einem weißlichen Lichtnebel bedeckt zu sein, welcher an der Stelle des Nachbildes gleichsam fortgenommen war, und die Farbe des Grundes in ihrer größten Reinheit hervortreten ließ. Aus diesen Versuchen geht die wichtige Folgerung hervor, daß die gesättigtesten objektiven Farben, welche existieren, die reinen Spektralfarben, im unermüdeten Auge noch nicht die gesättigteste Farbenempfindung hervorrufen, welche überhaupt möglich ist, sondern daß wir diese erst erreichen, wenn wir das Auge gegen die Komplementärfarben unempfindlich machen.

Auch in diesem Falle könnte man glauben, daß der weißliche Schein, welcher den Grund überzieht, der innere Lichtnebel sei, dessen störende Teile im Nachbilde entfernt seien. In der Tat sieht man, wenn man das Auge auf den dunklen Grund neben dem Spektrum richtet, ein komplementär gefärbtes Nachbild. Auch in diesem Falle halte ich diese Erklärung für ungenügend, weil die Erscheinung auf sehr hellen Spektralfarben zu sehen ist, gegen welche die scheinbare Helligkeit des Lichtnebels verschwindend klein erscheint. Folgen wir dagegen der Annahme von Th. Young, so würden wir hier die reinen Farbenempfindungen der einzelnen Nervenarten vor uns haben, gegen welche die Spektralfarben immer noch weißlich erscheinen müssen, weil nach der notwendigen Modifikation jener Annahme jede einzelne Art homogenen Lichts nicht bloß eine einzige Art von Nervenfasern ausschließlich erregen kann.

Alle diese Versuche über Nachbilder farbiger Objekte auf farbigem Grunde kann man nun auch so anstellen, daß man den Fixationspunkt wechselt, oder das Objekt dem Auge nähert und wieder davon entfernt, wie dies vorher für weiße Objekte beschrieben ist. Hat man zum Beispiel eine blaue Scheibe auf gelbem Grunde eine Weile so betrachtet, daß man einen Punkt derselben fixierte, und wechselt nun den Fixationspunkt, so fällt das Nachbild der blauen Scheibe zum Teil auf den Grund, zum Teil auf die Scheibe; ebenso das Nachbild des Grundes. Wo das Nachbild der Scheibe auf den Grund fällt, erscheint das Gelb gesättigter, ebenso das Blau, wo das Nachbild des Grundes auf die Scheibe fällt. Dagegen erscheint das Blau und Gelb mit Grau gemischt, wo das Nachbild der Scheibe auf die Scheibe, und das Nachbild des Grundes auf den Grund fällt. Der Erfolg der übrigen Abänderungen dieser Versuche läßt sich leicht übersehen. Zuweilen mischen sich auch Kontrasterscheinungen ein. Hat man ein weißes Papierschnitzelchen auf rotem Grunde fixiert, und wirft

dann das Nachbild auf Weiß, so ist das Nachbild des roten Grundes blaugrün, das des kleinen weißen Feldes rot durch Kontrast zu jenem Grün, wie sich im nächsten Paragraphen zeigen wird. Am besten legt man zu dem Ende das farbige Papier auf ein weißes Blatt, auf das farbige dann ein weißes Schnitzelchen, welches man mit einer Pinzette festhält, während man das farbige Blatt wegzieht. Schwach erscheint eine solche Kontrastfärbung auch um das Nachbild eines farbigen Quadrats auf weißem Grunde.

Aber nicht nur farbige, sondern auch weiße Objekte geben farbige Nachbilder, in denen die Farben gewöhnlich mannigfach wechseln. Man bezeichnet diese Erscheinungen gewöhnlich als das farbige Abklingen der Nachbilder. Die Reihenfolge der Farben ist dabei verschieden, je nach der Dauer und der Intensität des primären Eindrucks. Die Farbenfolge nach momentaner Anschauung finde ich übereinstimmend mit Fechner[1] und Seguin[2]. Das ursprüngliche Weiß geht schnell durch grünliches Blau (Seguin Grün) in schönes Indigblau, später in Violett oder Rosenrot über. Diese Farben sind hell und klar. Dann folgt ein schmutziges oder graues Orange, währenddessen sich das positive Nachbild meist schon in ein negatives verwandelt, und im negativen Bilde wird dieses Orange oft noch ein schmutziges Gelbgrün. Nach sehr kurzer Einwirkung des primären Lichts ist meist das Orange die letzte Farbe, und das Bild schwindet, ehe es negativ wird. Dieselbe Farbenfolge fand auch Aubert nach der Betrachtung des etwas bläulich gefärbten Entladungsfunkens einer Leydener Flasche, nur war das Orange auf dunklem Grunde nicht deutlich erkennbar, auf weißem dagegen sowohl diese Farbe als das folgende Grün sehr deutlich. Umgeben ist das Bild von einem gelben Hofe, wohl dem negativen Nachbilde des durch unregelmäßige Brechung im Auge zerstreuten bläulichen Lichts.

Die bisher beschriebenen Erscheinungen beziehen sich auf den Verlauf des Nachbildes im ganz dunkeln Felde. Wenn es dabei überhaupt zur Bildung negativer Nachbilder kommt, so erscheinen diese nur in das Eigenlicht des dunkeln Feldes dunkel eingezeichnet. Wenn man nun während des Bestehens eines solchen Nachbildes allmählich reagierendes Licht zuläßt, indem man die Hände, oder ein dunkles Tuch, mit dem man die Augen bedeckt hat, langsam hinwegzieht, so beobachtet man im allgemeinen, daß das Nachbild dabei in die späteren Stadien seiner Farbenentwickelung übergeht, und wieder zurückschreitet, wenn man das reagierende Licht wieder schwächer macht. Läßt man z. B. Licht hinzutreten, während das Bild im absoluten Dunkel blau ist, so geht es durch Rosarot in ein negatives gelbes Bild über. Deckt man schnell genug wieder zu, so findet man das Blau wieder. Ist das Bild im absoluten Dunkel rosarot, so wird es durch schwaches Licht gelbrot usw. Wenn das positive Nachbild im dunkeln Gesichtsfelde schließlich ganz geschwunden ist, sieht man auf schwach erleuchtetem Grunde noch längere Zeit ein graues oder grüngraues negatives Nachbild, und der hellere Grund, der es umgibt und der den nicht ermüdeten Stellen des Auges entspricht, erscheint dann rosarot.

Zur Erklärung dieser Erscheinungen hat Plateau die Annahme gemacht, daß die Dauer der einzelnen Stadien der Nachbilder für die verschiedenen Farben verschieden sei, und er suchte dies durch die im vorigen Paragraphen

[1] Pogg. Ann. L. 220.
[2] *Annales de Chimie.* 3. Ser. XLI. 415—416.

erwähnten Versuche auch direkt zu erweisen. Um eine vollständige Erklärung zu geben, müßten wir nicht bloß den Verlauf der nachbleibenden Reizung, sondern auch den Verlauf der Ermüdung vollständig kennen. Indessen läßt sich doch einiges aus ihnen schließen. Im ganz dunkeln Gesichtsfelde sind nämlich die ersten hellsten Stadien der Erscheinung ziemlich unabhängig von dem Grade der Ermüdung, weil diese erst in Betracht kommt, sobald die Helligkeit des positiven Nachbildes sich von der des inneren Lichtnebels nicht mehr sehr unterscheidet. Wir können deshalb als wahrscheinlich annehmen, daß die grünblaue, blaue und rosarote Phasen nur von der nachbleibenden Reizung bedingt sind, während bei der gelben und grünen, in denen sich das negative Nachbild ausbildet, auch die Ermüdung in Betracht kommt. Wir müssen daraus schließen, daß die nachbleibende Reizung für die drei Farben Rot, Grün, Violett in der Weise abnimmt, wie die nebenstehende Fig. 50 es darstellt. Darin bedeuten die horizontalen Abszissen die Zeit, die vertikalen Ordinaten der Kurven die Intensität der Reizung. Die ausgezogene Linie entspricht dem Grün, die punktierte dem Violett, die gestrichelte dem Rot. Die positive Nachwirkung nimmt für alle Farben kontinuierlich ab, aber so, daß die Abnahme des Rot im Anfang die schnellste, nachher die langsamste ist, die des Grün anfangs die langsamste, nachher die schnellste. Bei den dargestellten Größen der Farbenempfindung wird in der Zeit von 0 bis 1 Blaugrün überwiegen, bei 1 Blau, bei 2 Violett, bei 3 Purpur, welcher allmählich sich mehr in das Rote zieht. Nun mischt sich in Wirklichkeit aber die Ermüdung ein, welche in dem weißlichen inneren Lichtnebel ein grünliches Nachbild entwickelt, so daß also die Ermüdung für Grün, dessen nachbleibende Erregung am schnellsten geschwunden ist, schließlich am geringsten zu sein scheint. Dieses grüne negative Bild, mit positivem Rot gemischt, wird ein Gelb geben, welches je nach der größeren Stärke des einen oder anderen heller oder dunkler als der Grund erscheinen kann, und zuletzt in Grün übergeht, wenn auch das Rot erlischt. Bei Plateaus Versuchen über die Dauer der Farbeneindrücke stellte sich dasselbe Gesetz der Abnahme heraus, daß diejenigen Eindrücke, welche im Anfang am schnellsten abnahmen, schließlich am längsten in schwachen Resten dauerten. Ganz anders gestaltet sich die Reihe der Farbenerscheinungen, wenn die Ermüdung größer geworden ist, wie es nach längerer Einwirkung weißen Lichts, oder nach Einwirkung sehr intensiven Lichts stattfindet. Bei längerer Einwirkung weißen Lichts zeigt sich nach Fechners Beobachtungen der Einfluß der Ermüdung schon während der Betrachtung des Weiß, dadurch daß dieses farbig wird. Nachdem er die Augen eine Zeitlang geschlossen gehalten hatte, um die Nachwirkung früherer Eindrücke zu beseitigen, richtete er dieselben auf ein weißes im Sonnenschein auf schwarzem Papier liegendes Feld. In den ersten Momenten ließ sich wegen einer Art von Blendung kein sicheres Urteil über das Vorhandensein oder Nichtvorhandensein einer Farbe fällen; eine solche scheint sich in der Tat erst nach einiger Zeit zu entwickeln. Bald nämlich färbt sich das

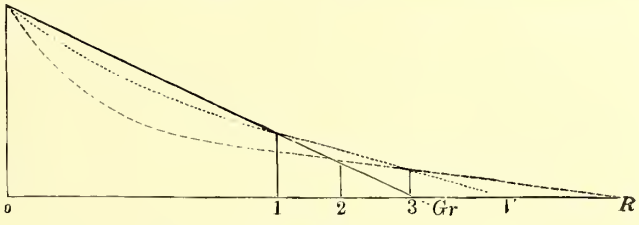


Fig. 50.

Papier entschieden gelb, dann blaugrau oder blau, ohne daß bei oftmaligen Versuchen eine Übergangsstufe durch Grün wahrzunehmen gewesen wäre, dann rotviolett oder rot. Die gelbe Phase ist die kürzeste; die blaue dauert oft ziemlich lange, ehe sie in die folgende übergeht. Nach der roten oder rotvioletten konnte er keine weitere wahrnehmen, obgleich er den Versuch bis zu großer Anstrengung des Auges fortsetzte. Auch im verbreiteten Tageslichte nahm er die angegebene Folge der Färbungen oft wahr, obschon einmal mit größerer Entschiedenheit als das andere Mal; die beiden letzten Färbungen erkannte er hier in der Regel leichter als die erste gelbe. Fechner stellt die Erscheinungen durch drei Kurven, aber mit anderen Grundfarben vor, ähnlich denen der Fig. 51, wo wieder die horizontalen Abszissen der Zeit proportional sind, die vertikalen der Erregungsstärke der Netzhaut bei dauernder Betrachtung einer weißen Fläche. Die ausgezogene Kurve entspricht dem Grün, die punktierte dem Rot, die gestrichelte dem Violett. In der Zeit von 0 bis 1 würde die Farbe gelbgrün, zur Zeit 1 weißlich grün, bei 2 weißlich blau, bei 3 violett, später rosarot sein.

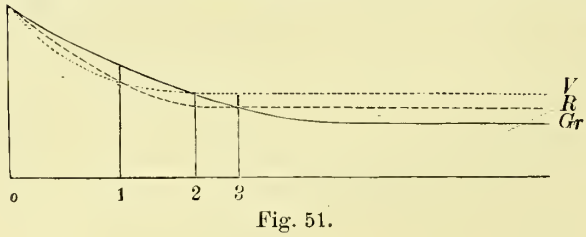


Fig. 51.

Nach längerer und stärkerer Einwirkung primären weißen Lichts zeigt das Nachbild auf ganz dunklem Grunde folgende Farbenreihe: Weiß, Blau, Grün, Rot, Blau und auf weißem Grunde schließlich noch blaugrün und gelb. Beim Rot wird das Bild negativ. Séguin schaltet in seiner Beschreibung einige Zwischenstufen mehr ein. Die Farben der ersten Reihe sind ihm Weiß, Grün, Blau, die der zweiten (negativen) Gelb, Rot, Violett, Blau, Grün. Wenn die Einwirkung des weißen Lichts eine gewisse Zeit überdauert hat, ist diese Farbenreihe konstant und wird durch längere Einwirkung nicht weiter geändert. Bei einer kürzeren, aber doch nicht bloß momentanen Dauer der primären Lichtwirkung, wo das primäre Weiß sich deutlich gelb gefärbt hatte, war die Farbenfolge Gelb, Blau, Rotgelb, dann wurde es negativ grün. Brücke gibt an: Grün, Blau, Violett, Rot, dann negativ ohne deutliche Farbe. Die blaue Phase scheint also immer die erste Änderung des primären Lichteindrucks zu sein, dann folgt eine rosenrote, rotgelbe bis grüne positive Phase, je nach der Dauer des primären Eindrucks.*

Auch bei diesen farbigen Nachbildern bestätigt sich die Regel, daß Erhellung des Grundes durch weißes Licht die späteren Phasen des Nachbildes herbeiführt, während Verminderung des reagierenden Lichts das Nachbild wieder auf frühere Phasen zurücktreten läßt. So oft ich Nachbilder beobachtet habe von gleichmäßig erleuchteten Flächen, für deren Umrisse mein Auge gut akkommodiert war, habe ich die Farbenveränderungen des Nachbildes entweder auf der ganzen Fläche gleichzeitig, oder auch wohl unregelmäßig von dieser oder jener Seite vorschreitend gesehen. Dagegen ist es nach dem Anblicke der Sonne oder ähnlicher blendender Objekte gewöhnlich, daß die Farben-

* Für mich und andere Deuteranopen tritt nach Einwirkung hellen weißen Lichts beim Blick auf dunklen Grund ein tiefblaues Nachbild auf. Während der Dauer dieses Nachbildes verblassen mir alle roten, gelben und gelbgrünen Farben (sowohl homogene Lichter wie Pigmente) zu Weiß bzw. Grau. N.

veränderungen des Bildes vom Rande nach der Mitte hin vorschreiten. Außer den Unregelmäßigkeiten der Brechung, welche für hellere Objekte immer größere Mengen Licht in die Nachbarschaft des Bildes verbreiten, kommt hier auch wohl in Betracht, daß bei schmerzhafter Blendung des Auges es fast unmöglich wird, die Akkommodation und Richtung des Auges festzuhalten. Die Folge davon ist, daß die der Mitte des Sonnenbildes entsprechende Stelle der Retina anhaltender und intensiver der Lichtwirkung unterworfen wird, als die dem Rande jenes Bildes näheren. An den Sonnenkörper selbst schließt sich ringsum der Widerschein des in der Atmosphäre und im Auge selbst diffus zerstreuten Lichts. Wenn man das im Dunkel ausgeruhte Auge plötzlich für einen Augenblick nach der Sonne blicken läßt, so erkennt man in der blendenden Lichtfläche kaum die Umrisse des Sonnenkörpers. So hat man denn in diesen Fällen immer eine vom Zentrum nach der Peripherie hin allmählich abnehmende Lichtwirkung, und der entspricht im Nachbilde ein verschiedener Verlauf der einzelnen Phasen. Je intensiver die Wirkung, desto langsamer verlaufen im ganzen die einzelnen Phasen, so daß man am Rande des Nachbildes meist die früheren Stadien sieht, welche allmählich gegen das Zentrum vorrücken. Außerdem ist die Reihenfolge der Farben in den peripherischen Teilen wegen der geringeren Ermüdung meist etwas abweichend von der in der Mitte. Das Nachbild hat in seinen ersten Stadien dieser Erklärung entsprechend einen größeren Umfang als die scheinbare Größe der Sonne beträgt, und man verfällt leicht in den Fehler, das ganze Nachbild für das Bild der Sonnenscheibe allein zu halten, und zu glauben, daß die verschiedenen farbigen Ringe, die sich darin entwickeln, dieser selbst angehören, während sie in Wirklichkeit ihrer Umgebung entsprechen. Um das Nachbild der Sonne möglichst regelmäßig zu entwickeln, nehme ich ein sehr dunkel gefärbtes Glas (oder ein berußtes Glas oder mehrere komplementär gefärbte Gläser übereinander gelegt), sehe damit nach der Sonne hin, welche durch das Glas nur noch als eine schwach sichtbare Lichtscheibe erscheinen muß. Dann nehme ich das Glas für einen Moment weg, und schließe sogleich die Augen. So werden dieselben verhältnismäßig wenig angegriffen, und haben wenig Zeit, ihre Stellung zu verändern, während doch das Nachbild sich sehr glänzend entwickelt. Unter diesen Umständen finde ich auch im Nachbilde meist einen Kern, welcher in seiner ganzen Ausbreitung eine gleichmäßige Färbung hat und ziemlich die Größe der scheinbaren Sonnenscheibe besitzt, so daß man die Abweichungen, welche am Rande vorkommen, den Fehlern der Brechung im Auge zuschreiben kann.

Man sieht unter diesen Umständen in der Umgebung des Sonnenbildes schnell die Phasen des Nachbildes verlaufen, welche weiße Gegenstände nach momentanem Anblick geben Positives Blau, Rosarot, welches durch Gelb in negatives Dunkelgrün übergeht, während das Bild der Sonne selbst in dieser ersten Phase als ein verwaschener, nicht regelmäßig runder weißer Fleck erscheint, der ungefähr zu der Zeit, wo der Grund rosenrot geworden ist, in die zweite Phase tritt und sich hellblau färbt. Die zweite geht meist schnell in die dritte Phase über, indem das Blau zuerst am Rande, dann auch in der Mitte grün wird, während am Rande ein rotgelber Saum entsteht, der dunkler als die Umgebung ist, und an dessen äußerem Rande sich dann auch wohl schon in dieser Phase ein noch dunklerer blaugrauer Saum abzeichnet. Richtet man die Augen während dieser Phase auf ein weißes Feld, so verwandelt sich das positive Grün durch Violett in das negative Blutrot der folgenden Phase.

Die vierte Phase entsteht, indem das Rot des Saumes sich über die Mitte des Bildes verbreitet. Der blaugraue Saum wird dafür breiter und dunkler. Das ganze Nachbild ist jetzt dunkler als die Umgebung. Letztere erscheint im Gegensatz dazu weißlich oder grünlich. Es ist dies das letzte negative Grün vom Bilde der Himmelsfläche. Die etwa vorhandenen Nachbilder der Fensterstäbe erscheinen darin hell. Blickt man in dieser Phase auf weißen Grund, so geht das Rot in Grünblau über.

In der fünften Phase endlich nimmt das ganze Nachbild die blaue Farbe des bisherigen Saumes an und verschwindet im dunklen Felde meist in diesem Stadium des Blau, während es auf weißem Felde grünblau erscheint.

Diesen von Fechner aufgestellten Phasen möchte ich noch eine sechste anschließen, wo man im dunklen Felde vom Nachbilde nichts mehr erkennt, wohl aber auf weißem Felde noch einen gelben oder bräunlichen Schein sieht. Endlich nach ziemlich langer Zeit schwindet auch dieser. Hat man während dieser Zeit, und selbst noch später, wo der gelbe Schein geschwunden ist, auf Weiß gesehen, und schließt plötzlich die Augen, so tritt noch wieder ein schwaches positives bläuliches Nachbild auf, welches schnell wieder schwindet. Öffnet man dann die Augen, indem man sie auf Weiß richtet, so sieht man im ersten Augenblick noch wieder das gelbe Nachbild. Die Erklärung dieser Erscheinung scheint mir in dem schon erwähnten Umstande zu suchen, daß in einem ermüdeten Nerven die neue Reizung langsamer verschwindet, als in den umgebenden unermüdeten Teilen der Netzhaut.

Es scheint übrigens der Verlauf dieser Nachbilder intensiven Lichts bei verschiedenen Personen nicht wesentlich verschieden zu sein, wenn sie unter denselben Umständen entwickelt werden; wenigstens stimmen in dieser Beziehung meine eigenen Beobachtungen, so weit sie reichen, mit Fechners und Seguins überein.

Bei dieser komplizierteren Farbenfolge dürfen wir vermuten, daß durch die stattfindende Ermüdung die Zeit, in der die Eindrücke der einzelnen Farben in der Netzhaut schwinden, so wie auch die Perzeption des inneren Lichtnebels geändert sei, und da wir weder diese Verhältnisse genau genug kennen, noch wissen, wie die Ermüdung selbst bei verschiedenen Graden derselben für die einzelnen Farbenempfindungen verschwindet, so ist eine vollständige Erklärung der einzelnen Stadien dieses farbigen Abklingens nicht möglich. Um sie zu geben, würde zuerst der Verlauf der Ermüdung und ihr Einfluß auf den Verlauf der Erregung für die einzelnen reineren Farbeneindrücke bestimmt und verglichen werden müssen.

Wenn wir das Abklingen des Nachbildes nach Eindrücken gesättigter Farben genau beobachten, ist die Erscheinung allerdings sehr viel einfacher, aber es fehlen Farbenveränderungen doch nicht ganz. Die Hauptzüge der Erscheinung sind schon vorher angegeben worden. Es erscheint zuerst ein positives dem primären Lichte gleich gefärbtes, später ein negatives komplementäres Bild. Der Übergang von positiv zu negativ geschieht nun aber nach lebhafteren Lichteindrücken in der Regel nicht so, daß das eine Bild einfach erblaßt, und dann das andere sichtbar würde, sondern in diesem Übergangsstadium verändert sich die Farbe durch weißliche Farbentöne hindurch. Hat man nur eine primäre Farbe im Gesichtsfelde gehabt, so erscheinen die Farben des abklingenden Bildes noch immer ziemlich gesättigt und sind von mehreren Beobachtern als gesättigte Farben angegeben worden, weil es im dunkeln Gesichtsfelde an einem

Vergleichspunkte fehlt. Wenn man aber an dem nur momentan gesehenen primären Objekte verschiedene Farben von ungefähr gleicher Helligkeit vor sich hatte, so sieht man, daß die Nachbilder im Übergangsstadium von positiv zu negativ viel geringere Farbenunterschiede zeigen, als die ursprünglichen Farben, indem sie alle stark gemischt sind mit dem rosaroten oder gelblichen Weiß, welches auch die Nachbilder momentan gesehener weißer Objekte zeigen. In dieser Beziehung ist namentlich das Nachbild eines momentan angeschauten prismatischen Spektrums interessant. Nachdem noch einige Sekunden die primären Farben im Nachbilde sichtbar gewesen sind, und die lichtschwachen äußersten Farben sich ganz verdunkelt haben, verwandelt sich das ganze Nachbild in einen rötlichweißen Fleck von der Gestalt des Spektrums, in welchem Farbenunterschiede kaum noch angedeutet sind, nur zieht das frühere Gelb und Orange etwas in das Bläuliche, woran sich an der Stelle des früheren Rot dessen, schon negativ gewordenes grünblaues Nachbild anschließt. Um mich über den Ort der früheren Farben im Nachbilde orientieren zu können, mußte ich auf dem weißen Schirm, auf den das Spektrum projiziert war, einen schwarzen Strich machen, der parallel den Farbenstreifen das Spektrum schnitt, und im Nachbilde sichtbar blieb. So erkannte ich, daß das rötlichweiße Nachbild der ganzen Ausdehnung des Spektrums vom Orange bis Indigo entspricht. Dasselbe Resultat gewinnt man, wenn man farbige Papiere von nahe gleicher Helligkeit von der Sonne bescheinen läßt, und durch momentanes Anschauen ein Nachbild entwickelt.

Es geht hieraus hervor, daß im positiven Nachbilde gefärbter Objekte nach momentanem Anblicke zuerst die vorherrschende Farbe schwindet, und damit das Nachbild dem eines weißen Objekts ähnlich wird, wobei namentlich gewöhnlich die rosenrote Phase eines solchen hervortritt. Dann entwickelt sich allmählich die Komplementärfarbe des negativen Nachbildes, aber sie kann schon sichtbar werden, noch ehe das positive Bild negativ geworden ist, sie kann also heller erscheinen als der dunkle Grund. Ich glaube das Hervortreten der Komplementärfarbe darauf zurückführen zu können, daß sich zu dieser Zeit das schwach und weiß gewordene positive Bild deckt mit dem durch die Ermüdung des Auges in dem inneren Lichtnebel entstehenden negativen und komplementären Bilde. Es ist klar, daß durch eine solche Deckung z. B. nach Anblick von Rot positives Weiß und negatives Blaugrün zusammen ein grünlich weißes positives Bild geben können. Diese positiv komplementären Bilder sind von mehreren Beobachtern[1] erwähnt. Hat man sie allein oder nur mit der primären Farbe zusammen im Gesichtsfelde, so erscheint die Komplementärfarbe ziemlich gesättigt. Kann man sie aber mit Nachbildern anderer Farben vergleichen, so habe ich stets gefunden, daß die Komplementärfarbe stark mit Weiß oder Grau gemischt erschien, solange sie noch heller als der Grund war, erst im negativen Nachbilde entwickelt sie sich dann gesättigter.

Im Sinne von Th. Youngs Farbentheorie würden wir diese Erscheinungen so erklären, daß jede, auch die gesättigtste objektive Farbe subjektiv mit Weiß gemischt ist, daß die starke Erregung, welche der vorherrschenden Farbe entspricht, verhältnismäßig schneller abnimmt, als die schwachen Erregungen,

[1] Purkinje, Zur Physiologie der Sinne. II. 110. — Fechner in Poggendorffs Ann. L. 213. — Brücke, Untersuchungen über subjektive Farben, aus den Denkschr. der Akad. zu Wien. Bd. III. S. 12. (Vergl. hierzu auch unten Zusatz I B. N.)

welche den anderen im Weiß enthaltenen Farben entsprechen, so daß der gesamte Farbeneindruck, indem er schwächer wird, auch sich dem Weiß nähert. Dann gewinnt in den lichtschwächeren Stadien des positiven Bildes endlich auch das durch Ermüdung bewirkte negative Bild mit seiner Färbung einen merklichen Einfluß.

Bei den einzelnen Farben geschieht das Abklingen nach momentanem Anblicke in etwas verschiedener Weise, je nach ihrer Verwandtschaft mit den Farbentönen des abklingenden Weiß. Beim Grün ist es meist am einfachsten, weil seine Komplementärfarbe Rosarot dem Rosarot des abklingenden Weiß gleich ist. Dieser Farbenton entwickelt sich deshalb besonders hell und schön. Grünliches Blau geht durch Blau und Violett, Blau durch Violett in Rosarot über, im letzteren Falle entwickelt sich die folgende Phase des Gelb reiner und kräftiger, weil sie mit der Komplementärfarbe des Blau zusammenfällt. Die vor dem Rosarot liegende grünblaue und blaue Phase des abklingenden Weiß kann sich bei den bisher genannten Farben wegen ihrer Ähnlichkeit mit diesen Farben selbst nicht wohl bemerklich machen, scheint es aber zu tun beim Gelb, welches durch grünliches Weiß in Violett übergeht, und beim Rot. Bei dem letzteren tritt statt des Rosarot mehr eine violette, später graugrüne Farbe ein. Es schwindet übrigens verhältnismäßig am schnellsten. Daß die grüne Stufe, wenn man keine anderen Farben zur Vergleichung im Gesichtsfelde hat, häufig gesättigt grün erscheint, ist schon vorher erwähnt. Es stimmen mit diesen Beobachtungen im wesentlichen auch die Versuche von Aubert, welche er bei Betrachtung des elektrischen Funkens durch farbige Gläser erhielt, nur das sehr gemischte Gelb gab ihm noch die gelbe Stufe des abklingenden Weiß nach dem Violett, ehe es zum negativen Blau kam. Meist auch bildete sich ein Lichthof, der die Stadien schneller durchlief.

Nach längerer oder stärkerer Einwirkung primären farbigen Lichts machen sich ebenfalls während des Überganges von dem positiven gleichfarbigen zum negativen komplementärgefärbten Bilde einige von den Phasen merklich, welche weißes Licht zu dieser Zeit zeigt. Namentlich tritt vielfach der rote Saum, und um diesen der blaugraue Saum auf. Fechner hat dergleichen Versuche angestellt, indem er durch Kombinationen verschiedener farbiger Mittel, welche nur eine oder zwei Farben des Spektrums durchließen, nach der Sonne sah; ich selbst kann einige Beobachtungen hinzufügen, welche ich mit prismatischen Farben angestellt habe, indem ich eine runde Öffnung betrachtete, durch welche Sonnenstrahlen, die ein Prisma passiert hatten, traten. Wenn das farbige Licht so intensiv ist, daß es weiß oder gelb erscheint, so bleibt dies auch anfangs im Nachbilde, dann entwickelt sich aber allmählich die eigentliche Farbe deutlich.

Homogenes rotes Licht brachte Fechner hervor, indem er teils durch ein rotes Glas, teils durch eine dicke Schicht Lackmustinktur nach der Sonne sah. Bei direkter Betrachtung erschien es wegen seiner hohen Intensität gelb. Auch das Nachbild war anfangs gelb, am Rande rot, und wurde später durch Verminderung seiner Intensität ganz rot, gleichzeitig tauchte ein schwarzblaugrüner Saum auf. Im dunkeln Felde entwickelt sich bei diesem Versuche gewöhnlich kein deutliches negatives Bild. Auf weißem Grund dagegen wird die grünblaue Farbe des Saumes zentral. Ich habe dasselbe an prismatischem Rot gesehen. Der Übergang vom Rot zum Grünblau geschah bei diesen Versuchen durch Violett. Nach etwas andauernder Betrachtung einer Flamme

durch ein rotes Glas geschieht er dagegen meist durch ein positives Gelbgrün, dem das negative Grünblau folgt.

Homogenes Gelb erhielt Fechner durch Kombination zweier blaßgelben, eines grünen und eines blaßroten Glases, wobei außer Gelb nur wenig Grün durchging. Das Nachbild erschien gelb mit rotem Rande, um letzteren bildete sich ein dunkel blaugrüner Ring. Bei einem einfachen gelben Glase, welches Rot, Gelb, Grün und eine Spur von Blau durchließ, folgte sich Gelb, Grün, dann Blaugrau mit rotschwarzem Umring. Bei reinem prismatischen Gelb sah ich ebenfalls den Übergang in Grün und den rotschwarzen Umring. Das Grün und Rot kommen im Nachbilde des Weiß unter denselben Umständen vor. Dagegen sah Purkinje[1], nachdem er eine Kerzenflamme 12 bis 60 Sekunden angeschaut hatte, die Farbenfolge: blendend weiß, gelb, rot, blau, mild weiß, schwarz.

Ziemlich reines Grün, mit Gelb gemischt, erhielt Fechner durch ein grünes, ein hellblaues und zwei hellgelbe Gläser. Die Sonne erschien dadurch grünlichweiß; ebenso das Nachbild mit schwarzrotem Umringe. Grün, mit sehr wenig Blau und Gelb gemischt, erhielt er durch drei grüne und ein gelbes Glas. Die Sonne erschien fast weiß, das Nachbild ebenso etwas grünlich mit bläulichweißem Saum, später bläulichweiß mit schwarzrotem Umring, um den eine Zeitlang ein schwach lilafarbener Schein sichtbar war. Ich selbst erhielt von prismatischem Grün ein grünes Nachbild, blau gesäumt, und auf weißem Grunde dunkles Purpur, gelb gesäumt.

Blau, mit Grün gemischt, erhielt Fechner durch eine Kupferlösung. Die Sonne erschien, dadurch gesehen, weiß. Das Nachbild anfangs ebenso weiß, dann blau. Es entwickelte sich dann ein positiv grüner, um diesen ein negativ roter Rand. Prismatisches Blau erzeugte mir ebenfalls den purpurnen Saum, während die Umgebung komplementär Goldgelb gefärbt erschien.

Homogenes Violett erhielt Fechner mittels einer dicken Schicht schwefelsaurer Kupferlösung, mit Ammoniak versetzt, und eines violetten Glases. Die Sonne erschien bläulichweiß. Ebenso anfangs das Nachbild; es bekam dann einen dunkelvioletten, um diesen einen schwarzroten Umring, die Umgebung grünlich. Die Erscheinung verschwand, ehe der Umring zentral wurde.

In allen diesen Fällen zeigt sich, wo der Saum des Nachbildes anfängt negativ zu werden, der rote Saum, der auch bei den Nachbildern des Weiß eintritt, als wäre die homogene Farbe mit Weiß gemischt, dessen Abklingungsphasen sich merklich machen zu der Zeit, wo die positive Nachwirkung der Hauptfarbe mit der komplementären negativen sich im Gleichgewicht hält.

Wenn das primär gesehene weiße oder farbige Licht von geringer Stärke oder bei mäßiger Stärke von sehr geringer Dauer ist, so bleiben positive Bilder zurück, die durch sehr schwach gefärbte weißliche Töne abklingen, deren Farbenton schwer zu benennen ist und durch Kontraste in der auffälligsten Weise abgeändert werden kann, wodurch denn die sonderbarsten scheinbaren Widersprüche in den Resultaten eintreten. Hat man viele verschieden gefärbte Objekte im Gesichtsfelde, so blassen die Farbenunterschiede im Nachbilde aus. Dieser Art scheinen auch die von Aubert bei Beleuchtung farbiger Objekte mit dem elektrischen Funken erhaltenen Nachbilder gewesen zu sein. So erscheinen ihm rote Quadrate auf Weiß im Nachbilde rot, ein breiterer roter Streifen,

[1] Beobachtungen und Versuche. I. 100.

aus demselben Papier geschnitten, mit weißen Quadraten auf weißem Grunde dagegen grün. Das Nachbild blauer und gelber Streifen mit schwarzen Quadraten auf schwarzem Grunde erschien ihm immer gelb, auf weißem Grunde lieferten beide Streifen blaue Nachbilder. Wovon diese Verschiedenheiten abhingen, bleibt noch zu ermitteln.

Andere Erscheinungen des farbigen Abklingens beobachtet man an rotierenden Scheiben, welche schwarze und weiße Sektoren haben, und nicht so schnell rotieren, daß ein ganz kontinuierlicher Eindruck im Auge entsteht. Wenn man eine solche Scheibe anfangs langsam, dann allmählich schneller rotieren läßt, und sie anhaltend betrachtet, aber so, daß man vermeidet der bewegten Figur mit dem Blicke zu folgen, bemerkt man, daß das Weiß sich färbt, und zwar an dem vorangehenden Rande rötlich, an dem hinterher folgenden bläulich. Bei schwächerem Licht zieht der rötliche Farbenton mehr in das Rotgelbe, der bläuliche in Violett, bei stärkerem der erste in Rosarot, der letztere in Grünblau. Bei langsamer Rotation ist der bläuliche Ton anfangs über einen breiteren Teil des Weiß ausgedehnt als der rötliche. Bei schneller Rotation dagegen breitet sich das Rot als Rosarot über das ganze Weiß aus, während das Grünblau auf die schwarzen Sektoren hinüberrückt; im ganzen erscheint dann auf der Scheibe das Violett zu überwiegen. Bei noch schnellerer Rotation kann man die verschiedenen Sektoren nicht mehr voneinander scheiden, man sieht dann das Feld fein gesprenkelt, und die Flecke zwischen violettem Rosa und Grüngrau hin und her flimmern. Endlich bei noch weiterer Steigerung der Rotationsgeschwindigkeit wird das Flimmern schwächer, die graue Mischfarbe des Weiß und Schwarz tritt immer mehr hervor und ist nur noch von veränderlichen größeren Flecken von violettem Rosa überlaufen, welche wie die Flecken und Streifen in gewässertem Seidenzeug geformt sind.*

Man sieht diese verschiedenen Stadien der Erscheinung sehr gut nebeneinander, wenn man eine Scheibe in drei konzentrische Ringe abteilt, wie in Fig. 52, und dem innersten zwei schwarze und zwei weiße Sektoren, dem mittleren von beiden je vier, dem äußeren je acht gibt. Wenn die Scheibe mit gewisser Schnelligkeit rotiert, hat man auf dem innersten Felde die überwiegend grünliche Färbung des Weiß, im mittleren die rosarote, im äußeren das feingesprenkelte Flimmern. Bei größerer Geschwindigkeit zeigt das innere Feld die rosarote Färbung, das mittlere das feingesprenkelte Flimmern, das äußere das mit Violett gewässerte Grau. Ich bemerke dabei noch, daß derjenige Streif, auf welchem das Rosarot am reinsten entwickelt ist, immer dunkler erscheint als die benachbarten Streifen, in denen der Wechsel langsamer oder schneller stattfindet. Die Ordnung der Farben, wie sie zuerst auf den weißen Streifen auftreten, ist an einer in Sektoren geteilten Scheibe erst nach einiger Übung zu erkennen,

Fig. 52.

*) Vergl. hierzu auch Bidwell, Proc. Roy. Soc. London **61**, 268—272 u. v. Kries, „Farbeninduktion durch weißes Licht“ in Nagels Handbuch d. Physiol. d. Menschen Bd. III, S. 245. N.

leichter an einer Scheibe (Fig. 53), die von einer schwarzen und einer gleich breiten weißen Spirallinie bedeckt ist. Es geht daraus hervor, daß wenn ein Punkt der Retina in schneller Abwechselung von weißem Lichte getroffen und wieder verdunkelt wird, so daß die Netzhaut sich im Zustande abwechselnd steigender und sinkender Erregung findet, die Zeit der Maxima der Erregung nicht für alle Farben auf denselben Augenblick fällt, sondern die Erregung für Rot und Violett früher eintritt als für Grün.

Es treten diese Farbenerscheinungen gewöhnlich nicht im ersten Augenblicke des Hinsehens ein, sondern erst nach einiger Zeit, und werden dann allmählich immer glänzender. Es scheint also ein gewisser Grad von Ermüdung des Auges durch das flimmernde Licht dafür notwendig zu sein. Außerdem verbinden sich damit nun noch andere Erscheinungen, welche von einer verschiedenen Empfänglichkeit verschiedener Stellen der Netzhaut für diese Art von Reizung herzurühren scheinen. Es werden nämlich in dem flimmernden Licht gewisse Muster sichtbar, die zum Teil in Beziehung zu bestimmten Stellen der Netzhaut stehen, Purkinjes[1] Lichtschattenfigur. Wenn nämlich die Geschwindigkeit der Scheibe so groß geworden ist, daß man die einzelnen Sektoren nicht mehr einzeln erkennt, so erscheint die Zahl der Sektoren vermehrt, und diese bilden gleichsam ein Gitter von verwaschen gezeichneten und gekrümmten Stäben, dessen Maschen in Richtung des Radius der Scheibe am längsten sind. Bei steigender Schnelligkeit der Bewegung wird die Zeichnung feiner, ähnlich der eines Stickmusters, und es erscheint an derjenigen Stelle des flimmernden Feldes, welche dem gelben Flecke entspricht, eine eigentümliche in schärferen Gegensätzen von Licht und Dunkel gezeichnete rundliche oder querovale Figur, zu vergleichen etwa mit einer vielblätterigen Rose, deren Blätter aber sich einer sechseckigen Form nähern. In ihrem Zentrum steht ein dunkler Punkt, von einem hellen Kreis umgeben. Dieselben Figuren kann man auch hervorbringen, indem man mit geschlossenen Augenlidern sich gegen ein helles Licht kehrt, und die auseinander gespreizten Finger vor dem Auge hin und her bewegt, so daß das Auge in schnellem Wechsel beleuchtet und beschattet wird. Überhaupt kommt es nur darauf an, einen solchen schnellen Wechsel von Schatten und Licht hervorzubringen. Purkinje unterscheidet bei diesen Figuren die primären und sekundären Gestalten. Die primären Gestalten sind in seinem rechten Auge größere und kleinere Vierecke, schachbrettartig dunkel und hell wechselnd, die den größten Teil des Gesichtsfeldes überziehen. Nur abwärts vom Mittelpunkt sieht er größere Sechsecke in einer Strecke ausgebreitet. Von der in meinen Augen ziemlich regelmäßig ausgebildeten Rosette des gelben Flecks scheint er nur einzelne Züge gesehen zu haben, dagegen sind bei mir die Flecken außerhalb des Zentrums weder regelmäßig viereckig

Fig. 53.

[1] Beobachtungen und Versuche zur Physiologie der Sinne. Bd. I. Prag 1823. S. 10.

noch sechseckig, sondern unregelmäßig, nach der Peripherie an Größe zunehmend. Ähnlich sah sie auch Purkinje mit seinem schwachsichtigen linken Auge. Als sekundäre Gestalten, die namentlich wenn er die geschlossenen Augenlider gegen die Sonne kehrt, erscheinen, beschreibt Purkinje achtstrahlige Sterne, und eigentümliche eckig gebrochene Spirallinien, welche sich aus den primären Mustern durch Verschiebung der hellen und dunkeln Vierecke entwickeln, übrigens sehr wandelbar sind. Die sekundären Gestalten erschienen ihm im linken, wie im rechten Auge, nur symmetrisch umgestellt.

Beobachtet man diese Erscheinungen auf den rotierenden Scheiben, so verwischt sich bei größerer Geschwindigkeit die Erscheinung immer mehr, und es bleiben nur noch die gewässerten Flecke als letzter Rest zurück, die schon vorher beschrieben sind. Zur Zeit, wo das Flimmern am heftigsten ist, verschwindet bei recht starrem Hinblicken zuweilen die ganze Figur und es wird anscheinend hinter ihr ein dunkelroter Grund sichtbar, in welchem eine große Menge ineinander verschlungener Strömungen vorhanden zu sein scheint, eine Erscheinung, in der Vierordt[1] den Blutlauf der Netzhautgefäße zu erkennen glaubt. In meinen eigenen Augen entspricht das Bild dieser Bewegung mehr uferlosen Strömungen, die fortdauernd ihr Bett wechseln, und sich hin und her schieben. Man könnte allerdings daran denken, daß die intermittierende Beleuchtung die Bewegung der Blutkörperchen sichtbar mache, ebenso wie man dadurch die Bewegungen und Formen der Tropfen eines ausfließenden Strahls sichtbar macht. Aber was ich selbst davon gesehen habe, würde ich nicht wagen für Blutbewegung zu erklären.

Läßt man auf den flimmernden Scheiben farbiges Licht mit Schwarz wechseln, indem man entweder auf den Scheiben farbige Sektoren anbringt, oder die schwarzweißen Scheiben durch farbige Gläser betrachtet, so zeigen auch unter diesen Umständen selbst homogene Farben Spuren von farbigem Abklingen. Sieht man z. B. durch ein rotes Glas, welches keine andere Farbe als Rot hindurchläßt, so erscheint der vorausgehende Rand der hellen Felder orange, der nachfolgende rosarot, entsprechend dem gelb und blau im weißen Licht. Der schwarze Grund überzieht sich gleichzeitig mit komplementärem Grün. Noch deutlicher wird die Komplementärfarbe[2], wenn man von den Spiralbändern das eine farbig, das andere grau macht, die Scheibe eine Weile laufen läßt und dann plötzlich anhält, oder auch wenn man mit einer Scheibe mit abwechselnd farbigen und weißen oder grauen Sektoren ebenso verfährt. Sinsteden[3] brauchte zu demselben Zwecke eine orangerote Scheibe mit ausgeschnittenen Sektoren, die über einer weißen, beschatteten lief. Wenn er die obere anhielt, erschien die untere lebhaft blau.

Ähnliche Erscheinungen erhielt auch E. Brücke, indem er eine kleine schwarze Scheibe vor einer farbigen Glastafel in schwingende Bewegung setzte. Namentlich auffallend war dabei die Erscheinung vor einer grünen Scheibe, indem die Stellen, vor denen Hell und Dunkel wechselte, rosarot erschienen, die ganz bedeckten und ganz unbedeckten dagegen grün.

Ein eigentümliches vielleicht hierher gehöriges Phänomen sind die sogenannten flatternden Herzen.* Auf farbigen Blättern aus steifem Papier

[1] Archiv für physiol. Heilkunde. 1856. Heft II.
[2] Dove in Poggendorffs Ann. LXXV. 526.
[3] Ebenda. LXXXIV. 45.

* Vergl. hierzu unten Zusatz I B. N.

sind Figuren von einer anderen lebhaften Farbe angebracht; am besten scheinen Rot und Blau zu wirken, die Farben müssen sehr lebhaft und gesättigt sein. Wenn man die Blätter betrachtet und mit einer gewissen Geschwindigkeit hin und her bewegt, scheinen die Figuren selbst gegen das Papier sich zu verschieben, und auf diesem hin und her zu schwanken. Der Grund der Erscheinung scheint darin zu liegen, daß der Lichteindruck im Auge für die verschiedenen Farben nicht gleich schnell zustande kommt und vergeht, und deshalb das Blau in der von dem Blatte beschriebenen Bahn scheinbar etwas hinter dem Rot zurückbleibt. Etwas Ähnliches wird auch wahrgenommen, wenn man das Auge statt des Objekts bewegt. So sahen Wheatstone,[1] Brücke und E. du Bois Reymond[2] bei Gasbeleuchtung, wenn sie das Auge über rote und grüne Tapeten hinstreifen ließen, daß das Muster sich scheinbar bewegte. Nach Brewster sieht man es auch, wenn helles Tageslicht durch ein kleines Loch in ein sonst dunkles Zimmer fällt.

Ich habe in der bisher gegebenen Darstellung mich der namentlich von Fechner durchgeführten Ansicht angeschlossen, wonach alle Erscheinungen der Nachbilder teils in einer noch fortbestehenden Reizung der Netzhaut, teils in einer verminderten Reizempfänglichkeit derselben ihren Grund finden. In der Tat, wenn man die bisherige Bedeutung des Begriffs Reizung und Reizempfänglichkeit festhält, müssen wir von fortbestehender Reizung sprechen, wenn ein Auge in absolutem Dunkel ein positives Nachbild sieht, und wir müssen die Reizempfänglichkeit als vermindert betrachten, wenn das Auge am Orte eines negativen Nachbilds äußeres Licht schwächer empfindet, als mit der nicht ermüdeten Netzhaut. Daß also Reizung fortbesteht und die Reizempfänglichkeit vermindert sei, ist keine Hypothese, sondern geht unmittelbar aus den Tatsachen hervor. Auch genügen diese beiden Umstände, um die bei weitem größte Zahl der augenfälligeren und konstanten Erscheinungen dieses Gebiets zu erklären, namentlich die Erscheinungen der veränderten Lichtintensität, der positiven gleichfarbigen und negativen komplementären Nachbilder. Die sehr zusammengesetzten Erscheinungen des farbigen Abklingens starker oder anhaltender Lichteindrücke vollständig auf ein einfaches Schema zurückzuführen, möchte freilich vor der Hand noch schwer sein und allerlei willkürliche Annahmen notwendig machen. Indessen läßt sich einsehen, warum diese Erscheinungen so veränderlich sein müssen. Wir kennen eben weder das Gesetz, wonach eine mehr oder weniger vorgeschrittene Ermüdung des Auges für die einzelnen Farben verschwindet, noch die Abhängigkeit, in welcher die Stärke des nachbleibenden Lichteindrucks von der Ermüdung steht. Die negativen komplementären Bilder im dunkeln Gesichtsfelde sind hierbei nach Fechners Ansicht als veränderte Empfindungsweisen der inneren Reize der Netzhaut anzusehen. Viele Physiker haben dagegen diese Bilder als Wirkungen einer neuen entgegengesetzten Tätigkeit der Netzhaut angesehen, und namentlich hat Plateau[3] diese Ansicht zu einer zusammenhängenden Theorie ausgebildet. Er wies nach, daß man dergleichen komplementär gefärbte Bilder auch beim gänzlichen Mangel alles äußeren Lichts sehen könne, und da er auf das Eigenlicht des Auges noch nicht aufmerksam geworden war, wußte er die Erscheinung eben nicht anders als durch eine neue entgegengesetzte Tätigkeit der Netzhaut zu erklären.

[1] *Inst.* Nr. 582. S. 75.

[2] Die Fortschritte in der Physik im Jahre 1845, redig. von Karsten. I. 223.

[3] *Ann. de Chim. et de Phys.* LIII. 386. Poggendorffs Ann. XXXII. 543.

Da er weiter auch noch spätere Wechsel des positiven und negativen Bildes bemerkte, so stellte er den Satz auf, daß die Netzhaut nach jedem heftigen Lichteindrucke erst durch eine Reihe von Oszillationen zur Ruhe käme, wobei sie abwechselnd nacheinander entgegengesetzte Zustände durchlaufen sollte. Diese entgegengesetzten Zustände entsprächen der Empfindung komplementärer Farben. Er brachte dies in Verbindung mit gewissen Kontrasterscheinungen, die im nächsten Paragraphen näher besprochen werden sollen, und nahm auch für die räumliche Ausbreitung des Eindrucks eine Reihe solcher Oszillationen an. Dagegen ist eben zu erinnern, daß die negativen komplementären Nachbilder nicht in einer aktiven Tätigkeit der Netzhaut bestehen, sondern im Gegenteil als Verminderungen der schon vorher bestehenden inneren Lichtempfindung sichtbar werden; und daß ferner jene Wechsel zwischen positiven und negativen Bildern, wie man bei genauer Aufmerksamkeit fast immer erkennt, von äußeren Umständen, namentlich von schwachen Änderungen in der Beleuchtung des Augengrundes abhängen. Ich halte es für sehr mißlich, diese zarten, äußerst schwankenden Erscheinungen, wie es die Nachbilder zur Zeit ihres Kampfes zwischen positiv und negativ im dunkeln Gesichtsfelde sind, bei der hoch gesteigerten Empfindlichkeit des Organs, welches lange im Dunkeln verweilt hat, wo nachweisbar kaum wahrnehmbare äußere Einflüsse die Verwandlung des Bildes herbeiführen, als Basis einer Theorie zu benutzen. Wir dürfen uns aber nicht wundern, wenn wir unter diesen Umständen noch nicht immer den Grund der eintretenden Veränderungen zu bezeichnen wissen. Übrigens hat schon Fechner auf eine andere Schwierigkeit von Plateaus Theorie aufmerksam gemacht. Dieser muß nämlich annehmen, daß bei den Nachbildern die komplementären Farben als entgegengesetzte Tätigkeiten der Netzhaut sich einander aufheben und Dunkelheit erzeugen. Wenn z. B. ein komplementär gefärbtes Nachbild besteht, ist die Wahrnehmung der primären Farbe beeinträchtigt. Wenn man nacheinander das Auge durch grün und rot ermüdet hat, ist das Nachbild schwarz. Wie läßt sich aber diese Behauptung vereinigen mit der Tatsache, daß die gleichzeitig von objektivem komplementären Lichte hervorgebrachten Empfindungen sich zu der von Weiß vereinigen, welches heller ist als jede der beiden Farben einzeln genommen?

Brücke betrachtet die positiv komplementären Nachbilder als unvereinbar mit Fechners Theorie. Ich habe schon vorher darauf aufmerksam gemacht, daß die Färbung dieser Bilder in der Tat sehr weißlich ist, und nur durch den Kontrast gegen die vorher gesehene primäre Farbe und den mangelnden Vergleich mit anderen Farben die komplementäre Farbe so grell hervortritt. Hat man gleichzeitig zwei primäre Farben nebeneinander gesehen, so überzeugt man sich leicht davon, daß ihre Nachbilder in den letzten Augenblicken ihrer positiven Erscheinung nur einen geringen Hauch der komplementären Farben zeigen, so daß ich glaube diese Bilder als aus einem positiven weißlichen Nachbilde und einem negativen komplementären gemischt ansehen zu dürfen, und dadurch diese Erscheinung auch unter Fechners Erklärung fügen zu können. Zu erwähnen ist noch eine rätselhafte Erscheinung, die Aubert beschreibt bei den Nachbildern von Gegenständen, die durch den elektrischen Funken beleuchtet waren. Hier sah er bei schwarzen und roten Quadraten auf weißem Grunde scheinbar gleichzeitig mit dem überschlagenden Funken leuchtende negative Bilder. Diese fehlten aber bei weißen Quadraten auf schwarzem Grunde, zuweilen erschienen sie gegen das Urbild verschoben. Ihnen folgten

erst die gleichfarbigen positiven Bilder. Von farbigen Streifen auf weißem oder schwarzem Grunde sollen die Nachbilder immer komplementär gefärbt, und immer heller als der Grund gewesen sein.

Ich halte es überhaupt für geraten, in diesem äußerst verwirrten Gebiete der mannigfaltigsten Erscheinungen eine theoretische Ansicht, die wie die Fechnersche bei weitem die größte Zahl der hierher gehörigen Erscheinungen leicht erklärt, und namentlich alle diejenigen gut erklärt, welche sich durch ihre Energie, Deutlichkeit und Konstanz auszeichnen, als leitenden Faden festzuhalten, selbst wenn sich auch einzelne flüchtigere Erscheinungen finden, für welche man gegenwärtig noch keine ganz genügende Erklärung geben kann, wie es die Farbenwandlungen sind, die in dem Augenblicke erfolgen, wo das Bild aus positiv in negativ übergeht und wo die entgegengesetzten Einflüsse der nachdauernden Reizung und der Ermüdung sich in einem leicht veränderlichen Gleichgewichte befinden. Für jetzt habe ich noch keine Erscheinung auffinden können, welche entschieden unvereinbar mit Fechners Erklärungsprinzipien wäre.

Beschrieben werden die positiven und negativen Nachbilder der Fenster 1634 von Peiresc[1]. Dann tritt der Versuch als eine Art Kunststück auf. Bonacursius behauptet gegen den Jesuiten Athan. Kircher[2], er könne bewirken, daß man im Finstern ebenso gut sehe, wie im Hellen, und behielt Recht, indem er Kircher im dunkeln Zimmer eine in einer Öffnung des Fensters befestigte Zeichnung starr betrachten ließ. Dann wurde das Zimmer ganz verdunkelt, und Kircher sah die Zeichnung deutlich wieder, indem er (was unnötig war) nach einem in der Hand gehaltenen weißen Papier blickte. Kircher gibt die Erklärung dazu, daß das Auge das eingesogene Licht wieder ausstrahle und das vorgehaltene Papier beleuchte. Mariotte[3] wiederholte ähnliche Versuche. Newton kannte die Blendungsbilder, und soll sie für psychischer Natur erklärt haben[4], weil er die Nachbilder, welche durch Blicken nach der Sonne erzeugt waren, noch längere Zeit dadurch wieder hervorrufen konnte, daß er die Aufmerksamkeit auf sie richtete. Er wurde zu diesen Versuchen veranlaßt durch eine Anfrage von Locke, der sie in Rob. Boyles Buch über die Farben erwähnt gefunden hatte. Eine vollständigere Theorie der Erscheinungen gab dann Jurin[5] im Jahre 1738, und zwar gründete er sie teils auf die Annahme, daß beim Aufhören einer stark angeregten Empfindung von selbst eine auf die Fortdauer der Reizung, teils auf die entgegengesetzte hervorgerufen würde. Ausführliche Beschreibungen der Erscheinungen gab Buffon[6], die dann später dem Pater Scherffer[7] das Material zur Begründung seiner Theorie gaben. Dieser stellte im Gegensatz zu Jurin die Ansicht auf, daß die Nachbilder — er kennt fast nur negative — durch die verminderte Empfindlichkeit der ermüdeten Netzhaut entstehen. Dasselbe Prinzip wendet er auch zur Erklärung der komplementären Farbe an, indem er sich dabei auf Newtons Farbenmischungsregel stützt. Eine andere etwas willkürlich aufgeputzte Theorie dieser Erscheinungen, die aber schon an Plateaus Oszillationen erinnert, gab Godart[8]. Eine Menge von

[1] Vita. p. 175, 296.
[2] Ars magna. p. 162.
[3] Mariotte, *Oeuvres*. p. 318.
[4] D. Brewster, Newtons Leben übers. von Goldberg. Leipzig 1833. S. 263.
[5] *Essay on distinct and ind. vis.* p. 170 in Smiths *Optics*. Cambridge 1738.
[6] *Mém. de Paris*. 1743. p. 215.
[7] Abhandlung von den zufälligen Farben. Wien 1765. — Lateinisch vom Jahre 1761, auch im *Journal de Physique de* Rozier. XXVI. 175 und 273. (1785)*.
[8] *Journal de Physique*. 1776. VIII. 1 und 269.

Beobachtungen kamen weiter hinzu durch Darwin[1], namentlich über die farbigen Nachbilder, durch Aepinus[2] und de la Hire[3] über das farbige Abklingen des Sonnenbildes, durch Gergonne[4], Brockedon[5], der sie zugleich zu einer Theorie der ästhetischen Farbenharmonie zu verwenden suchte, Lehot[6], der namentlich auf die Erscheinungen aufmerksam machte, die bei plötzlicher Änderung der Entfernung eines farbigen Feldes entstehen, Goethe[7], Beer[8] über Verschwinden der Farben durch Hinstarren bei operierten Starkranken, Himly und Troxler[9]. Purkinje[10], Osann[11], Splittgerber[12], Knochenhauer[13], Dove[14] über subjektive Farben an bewegten Objekten, Sinsteden[15], Scoresby[16], Grove[17] über die Wiederbelebung von Nachbildern durch abwechselnde Erhellung und Verdunkelung des Gesichtsfeldes, Séguin[18] und (viele und genaue Beobachtungen über Abklingen der Farben), Brücke[19], Aubert[20] über Nachbilder durch den elektrischen Funken erzeugt.

Von Versuchen zur theoretischen Zusammenfassung und Erklärung der hierher gehörigen Erscheinungen ist noch weiter zu erwähnen der Versuch von Prieur de la Côte d'or[21], sie auf das Prinzip des Kontrastes zurückzuführen, ferner die von Brewster aufgestellte Ansicht[22], daß die komplementäre Farbe sich zugleich mit der gesehenen entwickele und diese trübe. Es liefen die entgegenstehenden Ansichten zuletzt aus in die beiden zusammenfassenden Arbeiten von Plateau[23] und Fechner[24]. Der erstere brachte die Meinungen, welche entgegengesetzte Tätigkeiten der Netzhaut annehmen, in eine konsequente Form, Fechner dagegen, der mit einer außerordentlichen Selbstaufopferung auch gleichzeitig eine große Reihe genauer, selbst messender Versuche in diesem Gebiete ausgeführt hat, gab zuerst eine genügende Herleitung der negativen Bilder aus dem Prinzip der Ermüdung. Diese beiden Arbeiten bezeichnen im wesentlichen noch den gegenwärtigen Stand der Wissenschaft. Der Begriff der Ermüdung des Auges für eine einzelne Farbe bedurfte aber noch einer näheren Definition. Die Farbentheorie von Th. Young gab eine solche. Um sie zu prüfen, habe ich die Versuche über die Nachbilder der Spektralfarben aus-

---

[1] *Philos. Transact.* 1786. LXXVI. 313. — Zoonomie übers. von Brandis. Hannover 1795. II. 387.

[2] *Journ. de Phys.* XXVI. 291. — Novi Comment. Petrop. X. 286.

[3] Bei Porterfield *on the eye.* I. 343.

[4] *Journ. de Mathemat.* XXI. 291.

[5] *Quart. Journal of Sc.* N. XIV. 399; Wiener Zeitschr. VIII. 471.

[6] Fechner, Repertorium 1832. p. 229.

[7] Farbenlehre. I. 13, 20.

[8] Das Auge oder Versuch das edelste Geschenk des Schöpfers zu erhalten. S. 1—8.

[9] Himly, Ophthalmol. Bibl. Bd. I. Stück 2. S. 1—20. Bd. II. St. 2. S. 40.

[10] Beiträge. I. 72, 96.

[11] Pogg. Ann. XXXVII. 288.

[12] Ebenda. IL. 587.

[13] Ebenda. LIII. 346.

[14] Ebenda. LXXI. 112. LXXV. 524, 526.

[15] Ebenda. LXXXIV. 45.

[16] *Phil. Mag.* (4) VIII. 544. (1854.)

[17] *Phil. Mag.* (4) III. 435—436.

[18] *Ann. de Chimie et de Phys.* Ser. 3. XLI. 413—431. *C. R.* XXXIII. 642. XXXIV. 767. XXXV. 476.

[19] Denkschr. der k. k. Akad. zu Wien III: Pogg. Ann. LXXXIV. 418.

[20] Moleschott, Untersuchungen zur Naturl. Bd. V. 279.

[21] *Ann. de Chimie.* LIV. p. 1.

[22] *Phil. Mag.* II. 89. IV. 354. — Pogg. Ann. XXIX. LXI. 138.

[23] *Ann. de Chimie et de Phys.* 1833. LIII. 386; 1835. LVIII. 337; Pogg. Ann. XXXII. 543. Am vollständigsten in *Essai d'une Théorie génér. comprenant l'Ensemble des apparences visuelles, qui succèdent à la contemplation des objects colorés.* Bruxelles 1834.

[24] Pogg. Ann. XXXXIV. 221, 513; XLV. 227; L. 193, 427.

geführt[1], wobei ich auf die große Deutlichkeit der positiven Nachbilder nach momentaner Lichtwirkung aufmerksam wurde.

---


1634. Peirescii Vita. p. 175, 296.
1646. Athan. Kircher, Ars magna. p. 162.
1668. Mariotte, *Oeuvres*. p. 318.
1689. De la Hire bei Porterfield, *On the eye*. I. 343.
I. Newton, *Experiments on ocular spectra produced by the action of the sun's light on the retina. Edinb. Journ of Sc.* IV. 75; Newtons Leben von Brewster, übers. von Goldberg. Leipzig 1833. S. 263.
1738. Jurin, *Essay on distinct and indistinct vision*. p. 176. In Smiths *Optics*. Cambridge 1738.
1743. Buffon, *Dissertation sur les couleurs accidentelles. Mém. de Paris*. 1743. p. 147.
1765. Scherffer, Abhandlung von den zufälligen Farben. Wien 1765; latein. vom Jahre 1761; übers. im *Journ. de Physique de* Rozier. XXVI. 175 und 273.
Aepinus de coloribus accidentalibus. Nov. Com. Acad. Petr. X. 282. *Journal de Physique*. 1776. XXVI. 291.
1776. Godart, *Journ. de Physique*. VIII. 1 und 269.
1786. Darwin, *On the ocular spectra of light and colours. Phil. Trans*. 1786. p. 313; Zoonomie übers. von Brandis. Hannover 1795. II. 387.
1798. Comparetti, Observationes dioptricae et anatomicae de coloribus apparentibus. Patav. 1798.
1804. Prieur de la Côte d'or, Bemerkungen über die Farben und einige besondere Erscheinungen derselben. *Ann. de Chim*. LIV. p. 1. Gilb. Ann. XXXI. 315.
1810. v. Goethe, Zur Farbenlehre. I. 13, 20.
1817. Schulz. Über physiologische Farbenerscheinungen, insbesondere das phosphorische Augenlicht als Quelle derselben betrachtet. In Goethe für Naturwiss. II. 20, 38.
1819. Purkinje, Beiträge zur Physiologie der Sinne. I. 92.
1826. J. Müller, Zur vergl. Physiol. des Gesichtsinnes. Coblenz. p. 401.
1830. Lehot, *Annales des sciences d'observ. par* Saigey *et* Raspail 1830. III, 3. Frorieps Notizen XXVIII. 177; Fechner Repertorium 1832. p. 229.
Gergonne in seinem *Journ. de Mathem*. XXI. 291.
1833. Brewster in *Philos. Mag*. II. 89; IV. 354. Pogg. Ann. XXIX.
Plateau, *Ann. de chim. et de phys*. LIII. 386, LVIII. 337; Pogg. Ann. XXXII. 543. Am vollständigsten in: *Essai d'une Théorie génér. comprenant l'ensemble des apparences visuelles, qui succèdent à la contemplation des objets colorés et de celles, qui accompagnent cette contemplation, c'est à dire la persistance des impressions de la rétine, les couleurs accidentelles, l'irradiation, les effets de la juxtaposition des couleurs, les ombres colorées*. Bruxelles 1834.
1836. Osann, Über Ergänzungsfarben. Pogg. Ann. XXXVII. 287.
1838. *G. Th. Fechner, Über die subjektiven Komplementärfarben. Pogg. Ann. XLIV. 221—245; 513—530.
Derselbe, Scheibe zur Ergänzung subjektiver Komplementärfarben. Pogg. Ann. XLV. 227.
1840. *Derselbe, Über die subjektiven Nachbilder und Nebenbilder. Pogg. Ann. L. 193—221, 427—465.
Splittgerber in Pogg. Ann. XL. 587.
D. Brewster in *Phil. Mag*. XXIII. 354. Pogg. Ann. LXI. 138. (Kombination der verlöschenden Eindrücke mit komplementären.)
1841. Knochenhauer, Über Blendungsbilder. LIII. 346.
1845. Wheatstone, *Sur un effet singulier de juxtaposition de certaines couleurs dans des circonstances particulières. Inst*. 1845. Nr. 582. p. 75.
1848. H. W. Dove, Über Scheiben zur Darstellung subjektiver Farben. Pogg. Ann. LXXV. 526.


---

[1] Öffentlich vorgetragen in der Sitzung der Niederrheinischen Gesellschaft für Natur- und Heilkunde in Bonn am 3. Juli 1858 und in der Naturforscherversammlung zu Karlsruhe September 1858.

1848. Grüel, Über einen Apparat für subjektive Farbenerscheinungen. Pogg. Ann. LXXV. 524.
H. Taylor, *On the apparent motion of the figures in certain patterns of blue and red worsted. Phil. Mag.* XXXIII. 345; Frorieps Notizen IX. 33; *Arch. d. sc. ph. et nat.* X. 304.
1850. J. M. Séguin, *Sur les couleurs accidentelles. C. R.* XXXIII. 642. XXXIV. 767 — 768. XXXV. 476; *Ann. de chim. et de phys.* (3) XLI. 413—431; *Phil. Mag.* (4) III. 77. Silliman J. (2) XIII. 441.
Sinsteden, Über einen neuen Kreisel zur Darstellung subjektiver Komplementärfarben und eine eigentümliche Erscheinung, welche die Orangefarbe dabei zeigt. Pogg. Ann. LXXXIV. 45.
E. Brücke, Untersuchungen über subjektive Farben. Pogg. Ann. LXXXIV. 418. Wiener Denkschr. III. 95; *Arch. d. sc. phys. et nat.* XIX. 122.
1852. W. R. Grove, *On a mode of reviving dormant impressions on the retina. Phil. Mag.* (4) III. 435—436; *Inst.* 1852. p. 251—252. *Arch. d. sc. phys. et nat.* XX. 227—228; *Cosmos.* I. 237—238.
Dove in Pogg. Ann. LXXXV. 402. Zur Erklärung der flatternden Herzen.
1854. J. J. Oppel, Über das Phänomen der flatternden Herzen. Jahresber. des Frankfurter Vereins 1853—1854. S. 50—52; Hallesche Zeitschr. für Naturwissenschaft V. 319.
W. Scoresby, *An inquiry into some of the circumstances and principles which regulate the production of pictures on the retina of the human eye with their measure and endurance, their colours and changes. Phil. Mag.* (4) VII. 218—221; VIII 544. *Inst.* 1854. S. 154—156; *Proc. of Roy. Soc.* VI. 380—383. VII. 117—122. Athen. 1854, 1272.
1855. S. Marianini, *Sur une manière de voir facilement les couleurs accidentelles. Arch. d. sc. phys.* XXX. 325; *Cimento.* I. 165.
1856. Séguin, *Couleurs accidentelles. Cosmos.* IX. 39.
Vierordt, Archiv für physiol. Heilk. 1856. Heft 2.
1857. Melsens, *Recherches sur la persistance des impressions de la rétine. Bull. de Bruxelles* (2) III. 214—252. *Cl. d. sc.* 1857. p. 735—777.
1858. H. Aubert, Über das Verhalten der Nachbilder auf den peripherischen Teilen der Netzhaut. Moleschotts Untersuchungen zur Naturlehre. IV. 215—239.
J. M. Séguin, *Note sur les couleurs accidentelles. C. R.* XLVII, 198—200.
Helmholtz, Über Nachbilder, im Bericht über die 34. Vers. deutscher Naturf. in Karlsruhe. S. 225.
H. Aubert, Über das Verhalten der Nachbilder auf den peripherischen Teilen der Netzhaut, in Moleschotts Unters. zur Naturlehre IV. 215.
1859. Derselbe, Über die durch den elektrischen Funken erzeugten Nachbilder. Ebenda. V. 279.
H. Aubert, Über die durch den elektrischen Funken erzeugten Nachbilder. Moleschotts Untersuchungen. V. 296—314.
1861. J. Smith, *On the chromascope. Rep. of Brit. Assoc.* 1860 (2), p. 65—66. Ebenda. 1861 (2). 33.
1862. Aubert, Untersuchungen über die Sinnestätigkeiten der Netzhaut. Pogg. Ann. CXV. 87—116. CXVI, 249—278.
Rose, *Presentations of colour produced under novel conditions. Rep. of Brit. Assoc.* 1861 (2), p. 33. (Aus intermittierendem Weiß und Schwarz).
1864. Aubert, Physiologie der Netzhaut. Breslau. S. 347—386.
1865. E. Brücke, Über Ergänzungsfarben und Kontrastfarben. Wiener Sitzungsber. LI.

## § 24. Vom Kontraste.*

Wir haben im vorigen Paragraphen untersucht, wie nacheinander gesehene Farben sich gegenseitig verändern. Es bleibt uns jetzt noch übrig zu unter-

* Über die besonderen Verhältnisse, welche der Farbenkontrast bei den sog. anomalen Trichromaten und gewissen Dichromaten aufweist, vergl. unter Zusatz III. N.

suchen, welchen Einfluß verschiedene im Gesichtsfelde nebeneinander gleichzeitig erscheinende Helligkeiten und Farben aufeinander ausüben.

Da der Erfolg einer solchen Nebeneinanderstellung meistenteils der ist, daß jeder Teil des Gesichtsfeldes neben einem helleren dunkler, neben einem dunkleren heller aussieht, und seine Farbe neben einer anderen Farbe gesehen sich mehr oder weniger der Komplementärfarbe der letzteren annähert, so hat der hierin sich aussprechende Gegensatz zu dem Namen des Kontrastes Veranlassung gegeben. Genauer unterscheidet Chevreul die hierher gehörigen Erscheinungen unter dem Namen des simultanen Kontrastes von denjenigen, wo zwei Farben nacheinander auf derselben Netzhautstelle erscheinen, welche er mit dem Namen des successiven Kontrastes belegt.

Es kommen nun aber auch Fälle vor, wo die Farbe eines Teiles des Gesichtsfeldes durch Nebensetzung einer anderen Farbe so verändert wird, daß sie der letzteren selbst, nicht ihrer Komplementärfarbe ähnlicher wird. Auf diese würde der Name des Kontrastes nicht unmittelbar passen, wenn auch vielleicht in Wirklichkeit hier eine Farbe durch einen Kontrast gegen die Komplementärfarbe der anderen verändert wird. Um nun solche Fälle durch die Bezeichnung nicht auszuschließen, bezeichnet Brücke diejenige Farbe, welche durch die Wirkung einer im Gesichtsfelde danebenstehenden hervorgebracht wird, als die induzierte Farbe, und diejenige andere, welche die Veranlassung zur Erscheinung jener ersten gibt, als die induzierende Farbe. Dabei wollen wir, wenn das Feld, dessen Farbe verändert ist, selbst farbig ist, dessen Farbe wie früher die reagierende nennen. Indem die reagierende Farbe durch die induzierte verändert wird, entsteht die resultierende Farbe. Im allgemeinen passen also unmittelbar unter den Begriff des Kontrastes nur die gewöhnlichen Fälle, wo die induzierte Farbe der induzierenden komplementär ist. Es kommen aber Fälle vor, wo die induzierte Farbe der induzierenden gleich ist.

Was zunächst die Erscheinungen des successiven Kontrastes betrifft, so ergeben sich diese leicht aus dem, was im vorigen Paragraphen gesagt ist. Hat man ein Feld von der Farbe *A* und mittlerer Helligkeit angeschaut, und wendet das Auge auf ein anderes von der Farbe *B*, so ist die nachbleibende Reizung des Eindrucks *A* in der Regel nicht so groß, um auf einem zweiten Felde von mittlerer Helligkeit ein positives Nachbild zustande kommen zu lassen, man sieht also ein negatives Nachbild von *A* auf dem Felde *B*. Dadurch werden diejenigen Teile der Farbe *B* geschwächt, welche mit *A* gleichartig sind. Ist *B* von demselben Farbenton wie *A*, so wird es durch den Kontrast weißlicher, ist es komplementär, so wird es gesättigter. Liegt es auf einer oder der anderen Seite des Farbenkreises zwischen *A* und seiner Komplementärfarbe, so geht es in einen benachbarten Farbenton über, der weiter von *A* entfernt, näher an seiner Komplementärfarbe liegt. Übrigens erscheint *B* desto mehr verdunkelt, je heller *A* gewesen ist. Dies wäre also das allgemeine Gesetz des successiven Kontrastes, vorausgesetzt solche Helligkeiten beider Felder, daß eben nur negative Nachbilder zustande kommen.

Man kann sich nun leicht davon überzeugen, daß der successive Kontrast, d. h. der durch Nachbilder verursachte, auch dann eine große Rolle spielt, wenn man farbige Felder, die nebeneinander im Gesichtsfelde stehen, miteinander vergleicht. Man hat in diesen Fällen meist nur simultanen Kontrast zu sehen geglaubt, weil man bisher eine gewisse Eigentümlichkeit des menschlichen Blicks in der Lehre vom Kontraste wenig beachtet hat. Bei dem gewöhnlichen be-

quemen Gebrauche unserer Augen pflegen wir nämlich den Fixationspunkt fortdauernd langsam im Gesichtsfelde wandern zu lassen, so daß er nacheinander über die verschiedenen Teile der betrachteten Objekte hingleitet. Dieses Wandern des Blicks geschieht unwillkürlich, und wir sind so daran gewöhnt, daß es eine außerordentliche Anstrengung und Aufmerksamkeit erfordert, auch nur 10 bis 20 Sekunden lang den Blick ganz scharf auf einen bestimmten Punkt des Gesichtsfeldes zu fixieren. Sowie wir das tun, treten auch sogleich ungewöhnliche Erscheinungen ein. Es entwickeln sich nämlich scharf gezeichnete negative Nachbilder der Objekte, die, solange der Blick festgehalten wird, mit den Objekten zusammenfallen, und diese deshalb schnell undeutlich werden lassen. Deshalb tritt denn auch bald das Gefühl von Blendung und Anstrengung des Auges ein, sowie wir bei der Fixation des Gesichtspunktes beharren, der Trieb das Auge zu bewegen wird immer unwiderstehlicher und die kleinen Schwankungen seiner Stellung, welche ungeachtet unserer Anstrengung eintreten, verraten sich dadurch, daß an den Rändern der Objekte bald rechts, bald links Teile der entstandenen negativen Nachbilder aufblitzen. Auch ist diese Wanderung des Blicks, wodurch auf sämtlichen Teilen der Netzhaut ein fortdauernder Wechsel zwischen stärkerer und schwächerer Erregung und zwischen den verschiedenen Farben unterhalten wird, offenbar von großer Bedeutung für die ungestörte Gesundheit und Leistungsfähigkeit des Sehnervenapparats. Denn nichts greift das Auge so an, als wenn man häufig negative Nachbilder durch langes Hinstarren nach selbst nur mäßig beleuchteten Flächen entwickelt. Starke negative Nachbilder sind ja immer Zeichen hoch gesteigerter Ermüdung der Netzhaut.

Überlegen wir nun, was geschieht, wenn bei diesem Wandern des Blicks verschieden farbige oder verschieden helle Felder im Gesichtsfelde liegen. Wenn wir ein begrenztes farbiges Feld mit genauer Fixation des Blicks auf einen Punkt desselben betrachten, entwickelt sich ein scharf begrenztes Nachbild, welches deshalb eben leicht zu erkennen ist. Wenn wir hintereinander zwei verschiedene Punkte des Objekts eine Zeitlang fixiert haben, bilden sich zwei gut begrenzte Nachbilder aus, die sich zum Teil decken, aber schon nicht mehr so leicht, ohne besondere Aufmerksamkeit als Abbilder des Objekts erkannt werden. Ist aber der Blick langsam über den Gegenstand hingegangen, ohne irgendwo anzuhalten, so ist das Nachbild natürlich nur ein verwaschener Fleck, und wird, obgleich es für den aufmerksamen Beobachter wirklich da ist, schon nicht mehr so leicht erkannt. Geht nun der Blick auf ein anderes benachbartes Feld von anderer Farbe über, so wird diese Farbe natürlich durch den Einfluß des Nachbildes verändert, gerade so, als hätten wir nacheinander in demselben Teile des Gesichtsfeldes diese verschiedenen Farben gehabt. Wir haben also in einem solchen Falle nicht simultanen Kontrast, oder wenigstens diesen nicht allein, sondern wir haben auch hier successiven Kontrast, und die Erscheinungen sind ganz oder großenteils identisch mit den im vorigen Paragraphen beschriebenen. Um allein simultanen Kontrast zu haben, müssen wir notwendig besonders dafür sorgen, daß während des Versuchs der Blick ganz streng fixiert sei.

Wir werden die Erscheinungen des reinen simultanen Kontrastes, welche bei strenger Fixation des Blicks bestehen bleiben, später genauer untersuchen. Zunächst will ich noch die Erscheinungen beschreiben, die zum Teil dem simultanen Kontraste, größtenteils aber dem successiven angehören, wie sie bei

dem gewöhnlichen unbefangenen Gebrauche des Auges sich zeigen. Die Farbenänderungen, welche dabei eintreten, sind genau dieselben, welche ich schon für den reinen successiven Kontrast beschrieben habe. Sie sind im allgemeinen viel deutlicher und auffallender als die des reinen simultanen Kontrastes, und wo beide verschiedene Resultate herbeiführen könnten, überwiegen bei dem unbefangenen Gebrauche des Auges stets die des successiven Kontrastes; wo beide die gleichen Wirkungen hervorbringen, werden die Farbenveränderungen stets viel bedeutender, wenn man von der Fixation des Blicks zur Wanderung desselben übergeht.

Im allgemeinen ist es vorteilhaft für die Kontrastwirkungen, wenn die induzierende Farbe lichtstärker ist, als die reagierende, weil dann die Nachbilder jener lebhafter und anhaltender sind. Legt man also z. B. auf einen farbigen Papierbogen einen kleinen Kreis von weißem Papier, so wird dies Weiß komplementär gefärbt. Die Färbung ist aber auffallender, wenn man statt Weiß Grau nimmt, oder selbst Schwarz, da alles Schwarz bei diesen subjektiven Versuchen als ein dunkles Grau zu betrachten ist. Doch ist ein mittleres Grau in der Regel vorteilhafter für den Versuch als Schwarz. Die Kontrastwirkung kann in solchen Fällen so weit gehen, daß eine ziemlich lebhafte Farbe in die komplementäre umgekehrt wird. Legt man z. B. auf eine rote Glasscheibe ein kleines Stück orangerotes Papier (mit Mennige gefärbt) und hält dies gegen den hellen Himmel, so erscheint das rötliche Papier lebhaft grünblau, in der Komplementärfarbe des roten Glases, die nahehin auch seine eigene ist.

Ferner ist es vorteilhaft, wenn die induzierende Farbe einen großen Teil des Gesichtsfeldes bedeckt, weil dann die verschiedenen Netzhautstellen häufig und anhaltend von dieser Farbe getroffen und durch sie ermüdet werden. Die Kontrastfarben sind deshalb besonders lebhaft, wenn die reagierende Farbe ein kleines Feld einnimmt, welches rings umgeben ist von einem ausgedehnten Grunde, der mit der induzierenden Farbe gefüllt ist. In diesem Falle wird hauptsächlich nur die Farbe des kleinen Feldes verändert, nicht die des großen. Aber die Kontrastwirkungen fehlen auch nicht, wenn die beiden Felder gleich groß sind, dann ist der Einfluß ein gegenseitiger, und die Farbe eines jeden von beiden wird durch die Farbe des anderen geändert.

Endlich ist die Kontrastwirkung desto größer, je näher das induzierende Feld dem reagierenden im Gesichtsfelde liegt, weil, wenn der Blick von dem einen zum anderen Felde hinübergleitet, das Nachbild desto stärker entwickelt ist, je schneller er das andere Feld trifft. Dies zeigt sich sehr deutlich bei der Anordnung, welche Chevreul für seine Versuche gewählt hat. Er schneidet von jeder der beiden Farben, z. B. Gelb und Rot, zwei Streifen zurecht, legt dann einen gelben und einen roten Streifen dicht nebeneinander. Diese wollen wir bezeichnen mit $G_1$ und $R_1$. Dann legt er neben den gelben Streifen $G_1$ in kurzem Abstande einen zweiten gelben $G_2$ und ebenso neben den roten $R_1$ einen zweiten $R_2$. Die Kontrastwirkung macht sich dann nur an den beiden mittleren Streifen $G_1$ und $R_1$ merklich. Das Gelb von $G_1$ wird grünlich, indem es sich dem zu $R_1$ komplementären Blaugrün nähert, und $R_1$ erscheint purpurn, indem sich etwas Indigblau, die Komplementärfarbe von $G_1$, zumischt. Dagegen erscheinen die beiden seitlichen Streifen $G_2$ und $R_2$ in unveränderter Färbung, und man hat dadurch gute Gelegenheit, die Kontrastwirkung zu erkennen. Eben davon hängt es nun auch ab, daß, wenn etwas breitere Felder aneinander

stoßen, die Kontrastfärbung namentlich an den Rändern hervortritt. Jedesmal, wo der Blick von dem einen Felde *A* auf das andere *B* hinübergleitet, sind diejenigen Teile der Netzhaut, welche eben das Feld *A* verlassen, am meisten durch die Farbe *A* ermüdet, auf diese fällt nun das Bild der Randteile von *B*. Weniger ermüdet sind diejenigen Netzhautteile, welche etwas früher *A* verlassen haben, und schon weiter in das Feld *B* hineingerückt sind. Diesen erscheint deshalb die induzierte Farbe schwächer. So folgt, daß jedesmal, wo der Blick zum Felde *B* übergeht, die Randteile von *B* am meisten durch den Kontrast verändert sind, die weiter vom Rande entfernten Teile im Verhältnis ihrer Entfernung weniger. Stößt also z. B. ein grünes und ein blaues Feld aneinander, so erscheint der Rand des Grün etwas gelblicher als die Mitte, der Rand des Blau etwas violetter als seine Mitte, weil dort das dem Blau komplementäre Gelb sich zumischt, hier das dem Grün komplementäre Purpurrot. Man kann das Spiel der Nachbilder am Rande solcher Flächen sehr gut beobachten, wenn man sich eine Reihe von Fixationspunkten bezeichnet, und den Blick nur springend bewegt, indem man ihn eine kurze Zeit auf jedem Fixationspunkte festhält. Dann sieht man deutlich die wohlbegrenzten Nachbilder sich auf das andere Feld hinüberschieben. Die älteren, weiter vorgeschobenen sind blasser, die neuesten, welche dem Rande am nächsten bleiben, sind stärker.

Handelt es sich nicht um Unterschiede der Farbe, sondern der Helligkeit, so findet man, daß die Helligkeit des reagierenden Feldes neben einem helleren induzierenden vermindert erscheint, neben einem dunkleren dagegen vergrößert.

Übrigens wird bei diesen Versuchen das Hervortreten der Komplementärfarbe noch durch andere Umstände begünstigt, gegenüber den Methoden, negative Nachbilder zu sehen, welche im vorigen Paragraphen beschrieben sind. Während nämlich im allgemeinen nötig ist, ein farbiges Objekt absichtlich mehrere Sekunden zu fixieren, um ein deutliches Nachbild von einiger Dauer nachher auf einem gleichmäßig gefärbten Grunde zu erhalten, so zeigt es sich bei den Versuchen über Kontrast, daß nur eine ziemlich flüchtige Betrachtung der einen Farbe genügt, um die komplementäre Farbe auf dem anderen Felde zu induzieren, und daß diese komplementäre Farbe nachher viel dauernder ist, als es ein unter gleichen Umständen gewonnenes Nachbild sein würde. Um auf einem gleichmäßig gefärbten Grunde ein Nachbild zu erkennen, muß dieses gut entwickelt und gut begrenzt sein. Es bewegt sich mit dem Blicke hin und her, gibt sich dadurch gleich als eine subjektive Erscheinung zu erkennen, und wir sind für gewöhnlich daran gewöhnt, unsere Aufmerksamkeit nur den objektiven Gesichtserscheinungen zuzuwenden. Wenn dagegen ein verwaschenes Nachbild ein kleineres gefärbtes Feld bedeckt, welches seine objektive Begrenzung hat, und immer unter dem Einfluß des Nachbildes erscheint, so kann dieser Einfluß nicht unmittelbar in der Anschauung von den übrigen objektiven Erscheinungen des Gesichtsfeldes getrennt werden, und wird deshalb viel leichter ein Gegenstand unserer Aufmerksamkeit. Im dritten Abschnitte werden wir die hier erwähnte Eigentümlichkeit unserer Aufmerksamkeit näher zu besprechen haben.

Dazu kommt, daß die Ermüdung der Netzhaut bei den hier betrachteten Kontrasterscheinungen immer wieder erneuert wird, und die Wirkung deshalb anhaltend ist, während sie bei den meisten Methoden Nachbilder zu erzeugen ziemlich schnell vergeht.

Wir wenden uns nun zu den Erscheinungen des reinen simultanen Kontrastes. Um diese als solche sicher erkennen zu können, muß bei der

Anordnung der Versuche dafür gesorgt werden, daß keine Nachbilder entstehen können, daß der Teil der Netzhaut, welcher die induzierte Farbe empfinden soll, vorher auch nicht vorübergehend von dem Bilde des induzierenden Feldes getroffen wird. Vollständig kann dies in der Regel nur erreicht werden, wenn man die induzierende Farbe erst sichtbar macht, nachdem sich das Auge auf einen bestimmten Punkt des induzierten Feldes festgeheftet hat. Diesen Punkt muß es dann auch während der ganzen Dauer des Versuchs festhalten. Ist die induzierende Farbe nicht zu lichtstark oder zu gesättigt, so genügt es auch, die Augen, welche auf dunkeln wenig gefärbten Gegenständen herumgewandert sind, oder geschlossen waren, schnell auf das induzierte Feld zu richten, und dann einen Punkt von diesem festzuhalten, ohne vorher den Blick auf dem induzierenden verweilen zu lassen. Diese letztere Methode genügt namentlich deshalb in den meisten Fällen, weil die hierher gehörigen Kontrasterscheinungen sich gerade bei schwachen Farbenunterschieden des induzierenden und induzierten Feldes am deutlichsten zeigen, während umgekehrt die Erscheinungen des successiven Kontrastes durch starke Gegensätze der Farbe und Beleuchtung begünstigt werden.

Die hierher gehörigen Erscheinungen scheinen mir von ganz anderer Art zu sein, als die bisher betrachteten. Sie lassen sich im allgemeinen charakterisieren als Fälle, in denen eine genaue Beurteilung der reagierenden Farbe durch Vergleichung mit anderen als der induzierenden nicht möglich ist. In solchen Fällen sind wir geneigt, diejenigen Unterschiede, welche in der Anschauung deutlich und sicher wahrzunehmen sind, für größer zu halten als solche, welche entweder in der Anschauung nur unsicher heraustreten, oder mit Hilfe der Erinnerung beurteilt werden müssen. Es ist dies wohl ein allgemeines Gesetz bei allen unseren Wahrnehmungen. Ein Mensch mittlerer Größe neben einem sehr großen sieht klein aus, weil wir im Augenblick deutlich sehen, daß es größere Menschen gibt, aber nicht, daß es auch kleinere Menschen gibt. Derselbe Mensch mittlerer Größe, neben einen kleinen gestellt, wird groß aussehen.

Zwei Farben oder zwei Helligkeiten werden nun am sichersten verglichen, wenn sie im Gesichtsfelde ganz dicht aneinander grenzen, und ihre Grenze eben durch nichts weiter als ihren Unterschied bezeichnet ist. Je weiter sie voneinander getrennt sind, desto schwerer ihre Vergleichung; noch schwerer, wenn die eine nur aus der Erinnerung gegeben werden kann. Daraus ergibt sich nun schon, daß wenn ein farbiges Feld, nämlich das reagierende, von einem anderen, dem induzierenden, rings umschlossen wird, der Unterschied der Farbe des reagierenden Feldes von der des induzierenden deutlicher wahrgenommen wird, als der des reagierenden Feldes von anderen entfernt liegenden Farben. Am schwierigsten wird letztere Vergleichung, wenn das induzierende Feld das ganze Gesichtsfeld oder wenigstens seinen größten Teil einnimmt, und deshalb andere Farben nur durch die peripherischen Teile der Netzhaut mit unvollkommener Unterscheidungsfähigkeit der Farben empfunden werden, oder nur durch die Erinnerung gegeben sind. Im allgemeinen wird deshalb der oben gegebenen Regel gemäß der Unterschied des reagierenden Feldes von dem induzierenden verhältnismäßig zu groß erscheinen im Verhältnis zu den Unterschieden zwischen dem reagierenden Felde und anderen Farben, und zwar wird die Wirkung desto entschiedener werden, je mehr die induzierende Farbe alle anderen aus dem Gesichtsfelde ausschließt.

Es sind ferner Täuschungen in der Beurteilung kleiner Unterschiede leichter möglich, als bei großen Unterschieden; dementsprechend sind die Kontrasterscheinungen auch bei kleinen Unterschieden der Beleuchtung verhältnismäßig deutlicher als bei großen.

Endlich erscheint ein Unterschied, welcher die einzige Ursache der Trennung benachbarter Flächen ist, größer, als wenn er einer unter mehreren ist; daher im allgemeinen der simultane Kontrast lebhafter ist, wenn das induzierte vom induzierenden Felde durch nichts anderes als den Farbenunterschied getrennt ist.

Zu bemerken ist übrigens noch, daß man die Fixation der Objekte nicht zu lange fortsetzen darf. Bei lang anhaltender Fixation tritt durch die Ermüdung des Auges eine Reihe von Erscheinungen auf, die zum Teil den entgegengesetzten Erfolg, als der ursprüngliche Kontrast, herbeiführen.

Ich gehe jetzt über zur Beschreibung der einzelnen Fälle; der günstigste unter allen für die Lebhaftigkeit des Kontrastes ist der der sogenannten farbigen Schatten, weil hier meistens die drei genannten Bedingungen gleichzeitig erfüllt sind. Die farbigen Schatten haben deshalb auch unter allen Kontrasterscheinungen zuerst und am meisten die Aufmerksamkeit auf sich gezogen.

Die leichteste Art, sie zu beobachten, ist die, daß man ein Blatt Papier von entgegengesetzten Seiten her gleichzeitig mit abgeschwächtem Tageslicht und mit Kerzenlicht beleuchtet. Das Tageslicht, d. h. weißes Licht, welches vom bewölkten Himmel, oder von einer von der Sonne beschienenen weißen Fläche, oder auch vom Monde kommt, lasse man durch eine nicht zu breite Öffnung einfallen, damit es deutliche Schatten werfen könne. Dann stelle man auf das Papier irgend einen Körper (Finger, Bleistift), welcher Schatten wirft. Man wird zwei Schatten erkennen. Ich nenne Schatten des Tageslichts denjenigen, welcher auch, wenn die Kerze fehlte, da sein würde, und Schatten des Kerzenlichts denjenigen, dessen Dasein von der Anwesenheit der Kerze abhängt. Der Schatten des Tageslichts ist beleuchtet von rotgelbem Kerzenlicht, aber nicht von Tageslicht. Er erscheint in seiner objektiven Färbung, nämlich rotgelb. Der Schatten des Kerzenlichts wird von dem weißen Tageslichte, nicht aber von dem rotgelben Kerzenlichte beleuchtet. Er ist also objektiv weiß, erscheint aber blau, komplementär zur Farbe des Grundes, welche ein weißliches Rotgelb ist, da die nicht beschatteten Teile des Papiers gleichzeitig von dem weißen Tageslichte und dem rotgelben Kerzenlichte beschienen sind. Die Färbungen sind am deutlichsten, wenn man die Stärke beider Lichtquellen so abgleicht, daß die Schatten beider gleich dunkel sind.

Das Blau im Schatten des Kerzenlichts wird lebhafter, wenn man den Blick häufig über den rotgelben Grund wandern läßt, aber es entsteht auch ganz ohne Vermittelung von Nachbildern. Man merke und bezeichne sich irgend einen Punkt *a*, der in dem blauen Schatten liegt, setze vor die Kerze einen undurchsichtigen Schirm, lasse eine Weile nur Tageslicht auf das Papier fallen, bis die Nachwirkung des rotgelben Lichts vollständig erloschen ist, und das Tageslicht wieder vollkommen weiß erscheint. Nun fixiere man den Punkt *a* und ziehe den Schirm vor der Kerze weg. Sogleich färbt sich nun der Schatten des Kerzenlichts blau, und bleibt blau, wenn auch nicht die kleinste Schwankung des Blicks erfolgt ist. Ferner tritt auch die Kontrastfarbe im Schatten sogleich auf, wenn man die Augen eine Weile schließt und bedeckt, und sie dann plötzlich öffnend nach den Schatten hinwendet.

Man nehme eine innen geschwärzte Röhre, und gebe ihr eine solche Stellung, daß, wenn man hindurchsieht, das Auge nur Stellen des Papiers erblickt, welche im Schatten des Kerzenlichts liegen. Läßt man nun zuerst nur Tageslicht einfallen, blickt dann durch die Röhre, und läßt alsdann auch das Kerzenlicht einfallen, so sieht der Beobachter nichts von den mit Kerzenlicht beleuchteten Stellen, er bemerkt dessen Anwesenheit gar nicht, und das Aussehen der Stelle des Papiers, welche er durch die Röhre sieht, bleibt unverändert. Es folgt daraus, was hier bemerkt werden mag, da es von Osann bezweifelt wurde, daß objektiv die Farbe des Papiers im Schatten des Kerzenlichts nicht verändert wird.

Wenn man dagegen die schwarze Röhre, indem man hindurchsieht, so richtet, daß ein Teil des Feldes, welches man überblickt, von dem rotgelben Lichte der Kerze erleuchtet wird, so wird der Schatten des Kerzenlichts blau. Hat sich das Blau recht intensiv entwickelt, so richte man die Röhre wieder so, daß nichts als dies subjektive Blau im Gesichtsfelde ist. Jetzt bleibt das Blau bestehen, mag man nun dem Kerzenlicht Zutritt zu dem Rest des Papiers geben, oder die Kerze bedecken, was für den Beobachter natürlich einerlei ist, da er unter diesen Umständen nichts davon wahrnimmt. Die blaue Farbe ist in solchem Falle so beständig, daß Osann aus ähnlichen Versuchen eben geschlossen hat, sie sei objektiv. Diese Annahme widerlegt sich auch hier leicht dadurch, daß die blaue Farbe ja auch bestehen bleibt, wenn man die Kerze auslöscht. In dem Augenblicke aber, wo man die schwarze Röhre vom Auge wegnimmt, schwindet auch das subjektive Blau, da man es nun als identisch erkennt mit dem Weiß, welches das übrige Gesichtsfeld füllt. Kein Versuch zeigt schlagender und deutlicher den Einfluß des Urteils auf unsere Farbenbestimmungen. Nachdem einmal infolge des Kontrastes, sei er nun successiv oder simultan, sich das Urteil festgestellt hat, daß die Farbe im Schatten des Kerzenlichts blau sei, bleibt die Farbe scheinbar blau, wenn auch die Umstände, welche jene Bestimmung herbeigeführt haben, wegfallen, bis wir durch Wegnahme der schwarzen Röhre eine neue Vergleichung mit anderen Farben möglich machen, und durch neue Tatsachen unser Urteil anders bestimmen lassen.

Statt der rotgelben natürlichen Farbe des Kerzenlichts kann man nun auch andere Farben anwenden. Das Kerzenlicht kann man färben, indem man farbige Gläser vor die Kerze setzt, und so gefärbtes Kerzenlicht entweder mit Tageslicht oder mit ungefärbtem Kerzenlicht kombiniert. Am glänzendsten werden die Erscheinungen aber, wenn man die Versuche in einem dunkeln Zimmer anstellt und durch eine Öffnung des Ladens, die mit einem farbigen Glase gedeckt ist, gefärbtes Sonnenlicht eintreten läßt, durch eine andere kleine Öffnung weißes Tageslicht. In allen diesen Fällen erscheint das weiße Licht sowohl bei fixiertem, wie bei wanderndem Blick komplementär zu dem farbigen gefärbt.

Die komplementäre Farbe erscheint bei wanderndem Blicke sogar auch auf ganz schwarzen Flächen und auf Flächen, die schwach mit der herrschenden Farbe beleuchtet sind. Bei fixiertem Blicke erscheint eine dunkle Fläche bald komplementär, bald gleichfarbig. Bei schwächerem Lichte gewöhnlich ersteres, bei stärkerem Lichte letzteres, jedenfalls wird sie aber nach einiger Dauer der Fixation gleichfarbig dem herrschenden Lichte, während nur an den Rändern bei den unvermeidlichen kleinen Schwankungen der Gesichtsachse hin

und wieder die Komplementärfarbe aufblitzt. Sowie man den Blick wandern läßt, kommt die Komplementärfarbe immer zustande, oder wird glänzender, wenn sie schwach schon vorher da war.

Die Komplementärfarbe kommt sogar dann zum Vorschein, wenn man das Licht durch zwei Gläser von derselben Farbe gehen läßt, wovon aber das eine schwächer gefärbt ist als das andere, oder wenn man zwei gleiche Gläser anwendet, aber neben dem einen noch weißes Licht einfallen läßt. In solchen Fällen wird also der Farbenton des weißlicheren Schattens geradezu in den entgegengesetzten verwandelt.

Dieselben Kontrasterscheinungen, welche uns die farbigen Schatten bieten, treten nun stets ein, sobald der größte Teil des Gesichtsfeldes von einer vorwiegenden Farbe ansgefüllt ist, oder wenn ein großer Teil des Gesichtsfeldes unbeleuchtet ist, in dem beleuchteten Teile aber eine Farbe durch ihre Ausdehnung und Lichtstärke überwiegt.

Man nehme ein kleines Schnitzelchen weißen oder grauen Papiers, fasse es mit einer schmalarmigen Pinzette oder befestige es an einem Drahte und halte es nahe vor ein Auge, mit dem man es fixiert, während man das andere Auge schließt. Dann schiebe man hinter dem Papierschnitzelchen einen großen Bogen farbigen Papiers oder eine große farbige Glastafel vor, so daß der größte Teil des Gesichtsfeldes durch diese farbige Fläche eingenommen wird. Sowie dies geschieht, tritt die komplementäre Farbe auf dem Papierschnitzelchen hervor. Das reagierende Weiß darf im allgemeinen nicht zu hell genommen werden. Wenn man den Versuch in einem Zimmer anstellt, wo von einer Lampe oder von einer nicht zu großen Fensteröffnung her das Licht einfällt, kann man die Helligkeit des weißen Papiers leicht dadurch verändern, daß man das Licht mehr oder weniger senkrecht auffallen läßt, und so die passende Helligkeit auffinden. Eine mittlere Helligkeit des Weiß, welche ungefähr ebenso groß ist, wie die des farbigen Grundes, ist am vorteilhaftesten. Ist das Weiß zu hell, oder andererseits zu stark beschattet, so daß es sich dem Schwarz nähert, so sind die Kontrastfarben minder deutlich oder fehlen ganz. Je mehr die farbige Fläche vom Gesichtsfelde einnimmt, desto heller kann das Weiß gemacht werden. Wenn man sich mit dem Auge von den Objekten entfernt, und deren scheinbare Größe also kleiner wird, so wird die induzierte Farbe schwächer oder schwindet ganz. Ebenso schwindet sie bei anhaltendem Fixieren, und verwandelt sich in die der induzierenden Farbe gleiche, auch desto leichter, je kleiner die scheinbare Größe des induzierenden Feldes ist, je stärker dieses beleuchtet ist, und je dunkler das induzierte Feld ist. Läßt man das letztere aus einem schwarzen Scheibchen bestehen, und bringt dieses vor eine farbige Glasplatte, welche in einer Öffnung des Fensterladens befestigt ist, so daß man die lichte Himmelsfläche hindurchsieht, so ist häufig von Anfang an die schwarze Scheibe mit der Farbe des Glases überzogen, vorausgesetzt, daß man Nachbilder vermeidet. Ich finde hierbei keinen Unterschied der verschiedenen Farben als den, daß die käuflichen roten Gläser dunkler zu sein pflegen als die gelben, grünen und blauen, und daher für das Rot eine größere Lichtstärke, z. B. die von sonnenhellen Wolken nötig ist, um die gleiche Farbe von Anfang an zu erzeugen. Bei den blauen Gläsern, welche auch bei ziemlich dunkler Färbung die Erscheinung zeigen, könnte wohl auch die Fluoreszenz der Linse und Hornhaut dazu beitragen, blaues Licht über die dunkle Scheibe zu verbreiten. Nach kurzem Fixieren tritt immer die gleiche Farbe ein, und nur

am Rande des schwarzen Feldes zeigt sich der von Schwankungen der Gesichtslinie herrührende komplementäre Saum.

Wenn wir zunächst von den Fällen absehen, wo die induzierte Farbe der induzierenden gleich ist, so können wir das Hauptresultat der beschriebenen Versuche auch so ausdrücken. Wenn im Gesichtsfelde eine besondere Farbe überwiegend vorbereitet ist, so erscheint uns eine weißlichere Abstufung desselben Farbentons als Weiß, und wirkliches Weiß als komplementär gefärbt. Es wird also der Begriff dessen, was wir Weiß nennen, dabei verändert. Nun ist die Empfindung des Weiß keine einfache Empfindung, sondern in einem bestimmten Verhältnisse zusammengesetzt aus den Empfindungen der drei Grundfarben. Um nun in einem bestimmten Falle eine gegebene Farbe als Weiß anzuerkennen, wenn uns die Möglichkeit fehlt, sie mit anderem Weiß zu vergleichen, welches als solches anerkannt ist, müssen wir das Intensitätsverhältnis der drei darin enthaltenen Grundfarben als verändert oder unverändert wieder erkennen. Die Vergleichung der Intensität verschiedener Farbenempfindungen ist aber, wie wir in § 21 gesehen haben, eine höchst unsichere und ungenaue. Es kann also auch die darauf beruhende Bestimmung des Weiß keine sehr genaue sein, sondern es werden ziemlich bedeutende Schwankungen in dem, was wir zu verschiedenen Zeiten für Weiß halten, möglich sein, wie wir es denn auch wirklich finden.

In dieser Erklärung liegt auch zugleich der Grund, warum die Schwankungen der Vorstellung des Weiß nicht so weit gehen, daß wir eine gesättigte Farbe, z. B. das Rot der mit Kupferoxydul gefärbten Gläser, welche nur Licht vom roten Ende des Spektrums hindurchlassen, jemals für Weiß halten sollten, selbst wenn wir uns längere Zeit in einem Raume befinden, welcher sein Licht nur durch ein solches Glas empfängt. In der Tat sind wir nicht im Zweifel, wenn wir sehr lichtstarkes Rot mit lichtschwachem Blau vergleichen, welche Farbe die hellere sei. Über große Unterschiede entscheiden wir sicher, nicht aber über kleine. Wenn also dem Auge homogenes Licht dargeboten wird, und die Empfindung der roten Grundfarbe daher sehr intensiv ist, im Vergleich zu den Empfindungen der beiden anderen Grundfarben, so erkennen wir ohne Bedenken die Farbe als Rot an. Wir tun dies auch noch, wenn die Empfindung des Rot durch Ermüdung des Auges schon sehr bedeutend abgeschwächt ist. Wohl aber können wir unter solchen Umständen ein etwas weißliches, aber noch immer ziemlich gesättigtes Rot für Weiß halten, wie in dem oben beschriebenen Versuche, wo ein mennigrotes Papier vor einem stark erleuchteten roten Glase grünlich erscheint.

Noch auf einen anderen Umstand muß ich aufmerksam machen, der in einem solchen Falle vor allzu großen Irrtümern schützt. Es ist dies das Eigenlicht der Netzhaut, welches nach einiger Zeit bei wanderndem Blicke komplementär zur herrschenden Farbe erscheint, und sich auf allen ganz dunkeln Stellen des Gesichtsfeldes merklich macht. Wenn wir anhaltend durch ein rotes Glas sehen, erscheinen bald alle ganz dunkeln Objekte lebhaft grün. Neben dem Rot wird also seine Komplementärfarbe sichtbar, und wir werden dadurch gezwungen, das Rot als Rot anzuerkennen, wir können es nicht mit Weiß verwechseln. Bei herrschender weißer Beleuchtung erscheint der Nebel auf den dunkeln Stellen weiß, und wird eben deshalb nur bei genauer Aufmerksamkeit bemerkt. Selbst bei schwächer gefärbtem Licht, z. B. bei einer Lampe oder Kerze, macht sich das Eigenlicht der Netzhaut in dieser Weise

bemerklich. Man braucht nur vor eine weiße von der Kerze beleuchtete Papierfläche einen schmalen schwarzen, ganz unbeleuchteten Gegenstand zu halten, und den Blick über ihn und die Papierfläche wandern zu lassen, so erkennt man bald den indigblauen Schein auf dem Schwarz, welcher dem Rotgelb des Kerzenlichts komplementär ist. Weißes Papier bei Kerzenbeleuchtung erscheint ebenso gut weiß, wie bei Tageslicht. Blickt man aber durch eine innen geschwärzte Röhre, welche nur eine kleine Öffnung hat, nach dem Papier, und vergleicht das Aussehen des kleinen Teils der Papierfläche, den man noch sieht, mit dem dunkeln Felde, so erkennt man bald, daß jenes rotgelb ist, letzteres bläulich erscheint, während bei Tageslicht sich kein solcher Unterschied zeigt. Dies ist ein Mittel, um die Farbe der herrschenden Beleuchtung zu erkennen, selbst wenn man kein Tageslicht zur Vergleichung herbeischaffen kann. Es geht daraus auch hervor, daß die Farbe des Eigenlichts des Auges mit dem Weiß des Tageslichts übereinstimmt, und dadurch dieses Weiß für das Auge noch eine besondere Bedeutung hat und vor allen anderen weißlichen Farben berechtigt ist, den Namen des Weiß zu tragen.

Eine genaue Bestimmung des Weiß, bei verbreiteter farbiger Beleuchtung kann aus der Vergleichung mit dem Eigenlichte des Auges natürlich nicht hervorgehen, weil das letztere zu schwach ist.

Wenn wir also eine beschränkte Anzahl farbiger Objekte im Gesichtsfelde haben, so sind wir viel besser imstande, die relativen Unterschiede der vorhandenen Farben untereinander und von ihrem Mittel zu bestimmen, als den Unterschied dieses Mittels vom Weiß. Nun ist bei der normalen Beleuchtung durch Tageslicht, und wenn wir eine große Mannigfaltigkeit von Objekten frei vergleichen können, das Weiß des Sonnenlichts die Mittelfarbe, von der aus wir die Abweichungen der übrigen Farben nach den verschiedenen Richtungen der Farbentafel hin beurteilen. Ist aber eine andere Farbe *A* herrschend, so daß das Mittel aller gleichzeitig angeschauten Farben sich der Farbe *A* nähert, so sind wir geneigt, dieses Mittel als den Ausgangspunkt unserer zeitweiligen Farbenbestimmungen zu benutzen, und es mit Weiß zu identifizieren.

Charakteristisch für diese Deutung der Erscheinungen scheint es mir namentlich, daß, wenn Nachbilder vermieden werden, eine sehr schwache Färbung des herrschenden Lichts schon ebenso deutliche Kontrastfärbungen hervorbringt, wie eine höchst gesättigte. Das schwache Rotgelb des Kerzenlichts gibt den farbigen Schatten ein ganz intensives Blau. Ich finde nicht, daß dies Blau bei strenger Fixation lebhafter und deutlicher würde, wenn man ein intensiv gefärbtes rotgelbes Papier oder ein rotes Glas als Unterlage benutzt. Sowie man aber den Blick wandern läßt, geben die letzteren gesättigten Farben allerdings auch viel gesättigtere Nachbilder als das Kerzenlicht.

Außerordentlich schlagend zeigt sich die Wirkung schwacher Unterschiede bei einem zuerst von H. Meyer[1] angegebenen Verfahren. Man schneide ein Blatt aus feinem weißen Briefpapier und eines aus farbigem Papier, z. B. grünem, beide genau gleich groß, lege beide aufeinander, so daß sie sich genau decken, und schiebe ein Schnitzelchen grauen Papiers dazwischen, welches ebenso dunkel oder dunkler als das grüne ist. Weniger gut ist schwarzes oder weißes Papier. Durch das weiße Papier schimmert das Grün und Grau der Unterlage nur ganz schwach durch, und wo das letztere liegt, erscheint jetzt

[1] Poggendorffs Ann. XCV. 170.

ein sehr deutliches und starkes Rosarot. Gibt man der Unterlage eine andere Färbung, so erscheint das graue Schnitzelchen immer in der Komplementärfarbe durch das aufgelegte weiße scheinend. Es gelingt häufig die Verhältnisse so zu treffen, daß die komplementäre Kontrastfarbe deutlicher hervortritt als die schwache Farbe des Grundes. Ich finde nicht nur, daß ich in diesen Fällen die Kontrastfarbe ebensoleicht sehe, wie wenn der Grund aus einer gesättigten Farbe gebildet ist, ich müßte eigentlich sagen, daß ich sie leichter sehe, denn die Versuche über die Kontrastfarben von Papierschnitzelchen, unter welche ich bei strenger Fixation farbiges Papier hinschob, sind mir erst nach vielfältigen Bemühungen gelungen.

Direkt vergleichen lassen sich beide Erscheinungen in folgender Weise. Man bedecke das rote Blatt mit dem durchscheinenden weißen. Man lege auf das weiße ein Schnitzelchen undurchsichtigen weißen Papiers, welches man mit einer Pinzette festhält. Man fixiere letzteres aus solcher Nähe, daß es deutlich komplementär gefärbt ist, aber nur ganz kurze Zeit, weil sonst durch die Nachbilder der Unterschied der Farbe schnell erlischt, und ziehe plötzlich das weiße Briefpapier weg. Nun sieht man das Schnitzelchen auf dem unbedeckten roten Papier. Die Komplementärfärbung erscheint kaum stärker als vorher, wenn man nicht zu lange gewartet hat.

In der Tat kann nach der gegebenen Erklärung über die Schwankungen des Begriffs des Weiß die Veränderung dieses Begriffs immer nur bis zu einer gewissen Grenze gehen. Diese Grenze wird schon bei geringer Farbensättigung des Grundes erreicht, und scheint dann, wenn nicht Nachbilder sich einmischen, nicht viel weiter gehen zu können. Andererseits ist die Art einer Farbe im Vergleich mit einer ihr sehr nahe liegenden Farbe des Grundes viel sicherer festzustellen, als wenn sie mit einer viel gesättigteren verglichen wird. Auch sind zwei Farben leichter zu vergleichen, wenn beide gleich lichtstark sind, als wenn ihre Lichtstärke sehr verschieden ist. Darin scheint mir der Grund zu liegen, warum die Kontrastfärbung am zweifellosesten auftritt, wo induzierende und reagierende Farben gleich hell sind, und ihr Unterschied nicht die Lichtstärke, sondern nur die Farbe betrifft.

Dadurch scheint sich auch folgende Erscheinung zu erklären. Man halte mit der Pinzette ein weißes Papierschnitzelchen über einem gleich hellen weißen Grunde, und schiebe ein farbiges Papier zwischen das Schnitzelchen und den Grund ein. Auf dem neuen farbigen Grunde, wenn dieser groß genug ist, erscheint nun das Schnitzelchen komplementär gefärbt. Man lasse das farbige Papier zwei bis vier Sekunden liegen, und ziehe es wieder fort, immer sorgfältig einen Punkt des weißen Schnitzelchen fixierend. In diesem Augenblicke wird das weiße Schnitzelchen ebenso deutlich und bestimmt der bisher induzierenden Farbe gleichfarbig werden, als es vorher komplementär gefärbt wurde, ja in allen solchen Fällen, wo der farbige Grund nicht sehr ausgedehnt war, wird sogar jetzt die gleichartige Färbung deutlicher werden, als vorher die komplementäre. In der Tat ist nun nach Entfernung des farbigen Papiers der weiße Grund schwach komplementär gefärbt, und nahe gleich hell, wie das Papierschnitzelchen, und dadurch das Entstehen der Kontrastfarbe mehr begünstigt, als durch die intensivere Färbung des früher untergeschobenen farbigen Papiers. Ebenso ist es, wenn die Unterlage und das Schnitzelchen beide schwarz sind. Auch dann ist die gleichnamige Färbung bei Entfernung des farbigen Grundes deutlicher als bei der Unterschiebung desselben.

Natürlich verhält es sich ganz ebenso, wenn man das Papierschnitzelchen gleichzeitig mit dem farbigen Grunde entfernt, und nun die Nachbilder beider auf einen weißen oder schwarzen Grund projiziert, und es rechtfertigt sich hierdurch, daß wir im vorigen Paragraphen die Farbe des Nachbildes des Weiß in diesem Falle für eine Kontrastfarbe erklärten.

Ehe wir die Fälle von Kontrast verlassen, bei denen die induzierte Farbe den größten Teil des Gesichtsfeldes einnimmt, müssen wir noch den Grund der zuweilen erscheinenden Färbung des reagierenden Feldes, welche der induzierenden gleichnamig ist, erörtern. Es kommt dies unter zwei Bedingungen vor, erstens nämlich wenn das induzierende Feld eine sehr große Lichtstärke hat, zweitens bei langem Fixieren desselben Punktes.

Wenn das induzierende Feld eine sehr große Lichtstärke hat, halte ich das Auftreten der gleichnamigen Färbung im reagierenden Felde nicht für eine subjektive Erscheinung, sondern für eine Ausbreitung objektiven Lichts. Jede feste und flüssige durchsichtige Substanz, welche wir kennen, zerstreut kleine Mengen des Lichts, welches durch sie hindurchgeht, nach allen Seiten hin, und erscheint deshalb, wenn starkes Licht durch sie hingeht, selbst schwach erleuchtet. Daß dies auch mit der Hornhaut und der Kristallinse des Auges der Fall ist, haben wir schon oben (Bd. I, S. 165) erwähnt. Man denke ferner an die entoptischen Objekte des Glaskörpers, welche notwendig das durchgehende Licht teilweise von seinem Wege ablenken müssen, man denke daran, daß Licht von den erleuchteten Stellen der Netzhaut nach den übrigen Teilen des Abgrundes hin reflektiert wird, so ergibt sich, daß wenn eine größere Menge Licht in das Auge eindringt, immer merkliche Mengen davon über einen größeren oder kleineren Teil des Augengrundes ausgebreitet sein werden. Am deutlichsten zeigt sich diese Beleuchtung durch diffuses Licht bei der zweiten in § 15 (Bd. I) beschriebenen Methode, die Gefäße der Retina sichtbar zu machen, indem man eine Kerzenflamme unterhalb des Auges hin und her bewegt. In dem Lichtnebel, welcher hierbei den Grund des Auges ausfüllt, erscheinen die Schatten der Netzhautgefäße; die Beleuchtung ist also jedenfalls eine objektive, und nicht bloß eine Ausbreitung der Lichtempfindlichkeit in der Netzhaut.

Nun kann man sich bei objektiven Versuchen mit Glaslinsen leicht überzeugen, daß das diffus zerstreute Licht immer am stärksten in der Nähe des regelmäßig gebrochenen Lichtbündels ist, und schwächer wird, je weiter man sich von diesem entfernt. Läßt man Sonnenlicht durch die Öffnung eines schwarzen Schirms auf eine entfernte Linse fallen, und fängt das Bild der hellen Öffnung auf einem weißen Schirm auf, so sieht man das helle Bildchen von einem weißen Nebelschein umgeben, der auch sichtbar wird, wenn man das Bild der hellen Öffnung selbst dicht am Rande des Schirms vorbeigehen läßt. Jener weiße Nebelschein ist also keine im Auge entstehende Irradiation, sondern eine objektive Erscheinung. Noch besser sieht man es, wenn man in den Schirm eine kleine Öffnung macht, die man dem Bilde der hellen Öffnung nahe bringt, ohne sie aber damit zusammenfallen zu lassen. Blickt man durch die Öffnung des Schirms nach der Linse, so erscheint diese desto heller erleuchtet, je näher man dem optischen Bilde der Lichtquelle kommt. Ein ganz entsprechendes Phänomen entsteht im Auge. Wenn man eine Lichtflamme vor einem sehr dunkeln Felde sieht, z. B. vor der geöffneten Tür eines ganz dunkeln Raumes, so erscheint die Flamme von einem weißlichen Nebel umgeben, der in ihrer unmittelbaren Nähe am hellsten ist. Man bemerkt diesen Lichtschein

am besten, wenn man einen kleinen undurchsichtigen Körper zwischen das Auge und die Flamme bringt, so daß diese nicht mehr gesehen wird. Augenblicklich verschwindet auch der Lichtnebel vor dem Grunde, und man sieht diesen in seiner eigentümlichen Schwärze. Ist das Licht farbig, so ist natürlich auch der zerstreute Lichtnebel von derselben Farbe. Ich glaube auch in diesem Falle nicht zweifeln zu dürfen, daß dieser Lichtnebel von der Zerstreuung objektiven Lichts herrührt, da die Verteilung des Lichts ganz dieselbe ist, welche ein System Glaslinsen unter denselben Umständen geben würde. Aber allerdings fehlt hier der Nachweis mittels der Schatten der Netzhautgefäße, der in dem erst erwähnten Falle gegeben werden konnte. Beim blauen Lichte kommt endlich auch noch das durch Fluoreszenz der Linse zerstreute weißbläuliche Licht hinzu, welches sich ebenfalls über den ganzen Grund des Auges ausbreitet. Wenn also eine große Menge farbigen Lichts in das Auge fällt, werden immer auch solche Teile der Netzhaut, welche Bilder dunkler Objekte empfangen, von dem herrschenden Lichte schwach beleuchtet werden, und zwar desto stärker, je näher sie den Bildern der hellen Flächen liegen. Außerdem besteht im Bereich des dunkeln Bildes die innere Reizung der Nervenmasse, das weißliche Eigenlicht der Netzhaut. Dieses allein genommen, würde im Kontrast zur herrschenden Farbe dieser komplementär erscheinen. Kommt aber viel der induzierenden Farbe gleichnamiges Licht hinzu, so wird dies von Anfang an den überwiegenden Eindruck machen, daher denn, wie oben bemerkt, schwarze Scheibchen vor farbigen Gläsern bei geringerer Helligkeit komplementär, bei größerer gleichfarbig erscheinen.

Der zweite Fall, wo die induzierte Farbe der induzierenden gleichartig ist, bei langer Fixation nämlich, erklärt sich aus dem, was im vorigen Paragraphen über das allmähliche Erlöschen der Bilder durch lange Fixation beigebracht worden ist. Es ist schon dort bemerkt worden, daß wenn eine Stelle der Netzhaut lange Zeit hindurch von demselben Lichteindrucke getroffen wird, die Empfindung der Helligkeit immer schwächer und die Farbe immer weniger gesättigt wird. Indessen bemerken wir diese Veränderung des Eindrucks nur, wenn wir Vergleichungen mit dem Eindruck, den dasselbe Licht auf unermüdete Netzhautstellen macht, anstellen. Wir halten also dabei das Urteil über die Farbe und Helligkeit fest, welches wir uns beim ersten Anblick gebildet haben. In der Tat würden wir, selbst wenn wir den Wechsel des Eindrucks bei einiger Aufmerksamkeit bemerken, ihn bald als subjektive Erscheinung erkennen lernen, da er ja in jedem einzelnen Falle immer und immer wiederkehrt, und würden ihn, wie andere ähnliche subjektive Erscheinungen, bald übersehen lernen.

Wenn die fixierte Fläche hellere und dunklere Teile hat, so verlöschen diese Unterschiede bei der Abschwächung des Eindrucks allmählich. Man bezeichne sich auf einer solchen Fläche einen Punkt, der als Fixationspunkt dient; übrigens ist es vorteilhaft, wenn die Grenzen zwischen hellen und dunkeln Teilen verwaschen sind, um bei kleinen Schwankungen des Auges nicht zu stark gezeichnete Nachbilder zu geben. Fixiert man scharf und fest, so verlöschen in 10 bis 20 Sekunden oft recht auffallende Lichtunterschiede, und zwar in der Weise, daß anfangs die helleren Teile dunkler werden, und gleichzeitig die dunkleren heller. Auffallend ist dabei auch, daß eine größere dunkle Masse sich häufig in einen verwaschenen dunkeln Fleck verwandelt, oder eine helle Masse in einen verwaschenen hellen Fleck, als wären die Objekte mit dünnflüssigen Farben gemalt, und diese verliefen ineinander. Übrigens ist in

dieser Weise der Versuch schwer auszuführen, wegen der langen starren Fixation, und sehr anstrengend. Jeder Lidschlag, jede kleine Verrückung des Auges stellt das Bild wieder her. Viel bequemer und vollständiger gelingt er, wenn wir Objekte benutzen, die zur Netzhaut selbst eine feste Lage haben, nämlich die Netzhautgefäße. Ich habe im § 15 (Bd. I) die Methoden auseinandergesetzt, die Netzhautgefäße sichtbar zu machen. Das Gemeinsame dieser Methoden besteht darin, daß man den Schatten der Gefäße in eine ungewöhnliche Richtung fallen läßt, oder den Kernschatten zu verlängern sucht. Dabei ist aber auch nötig, die Richtung des Schatten werfenden Lichts fortdauernd zu verändern, und man sieht nur diejenigen Gefäße, deren Schatten den Ort wechselt. Sowie man die Lichtquelle unverrückt läßt, schwinden die Gefäßstämme im Gesichtsfelde in wenigen Sekunden, indem sie so hell werden wie das übrige Gesichtsfeld. Sie schwinden schneller und vollständiger, als es Bilder äußerer Gegenstände tun, bei denen die Schwierigkeit der Fixation besteht; sie schwinden um so schneller, je schwächer die Beleuchtung ist. Am längsten halten sie sich, wenn man durch eine Linse Sonnenlicht auf die äußere Seite der Sklerotica konzentriert, weil hier das Feld am hellsten ist.

Einfache Überlegungen zeigen übrigens leicht, daß das Verschwinden der Netzhautgefäße ganz dieselben Ursachen hat, wie das Verschwinden aller fest fixierten Bilder, und daß hierbei keineswegs irgend eine besondere Eigentümlichkeit der hinter den Gefäßen liegenden Netzhautteile im Spiel ist. Es ist nicht zulässig anzunehmen, daß diese Stellen etwa mit einer größeren Erregbarkeit begabt seien, als der Rest der Netzhaut, und deshalb trotz der Beschattung ebenso starke Empfindung hätten, wie die anderen. Denn wenn wir den Schatten in ungewöhnlicher Richtung entwerfen, indem wir einen Teil der Sklera durch die Pupille oder von außen beleuchten, und zur Lichtquelle für den Augengrund machen, so verhalten sich die neu beschatteten Teile der Netzhaut genau ebenso, wie die gewöhnlich beschatteten. Auch auf jenen schwindet das Bild schnell, wenn es seinen Platz nicht wechselt, und die gewöhnlich beschatteten Teile geben sich keineswegs durch eine dauernd größere Helligkeit zu erkennen. Vorübergehend blitzen allerdings helle Streifen neben dem Schatten auf, sobald der Schatten eine Zeit lang still gestanden hat, und dann wieder sich zu bewegen beginnt. Aber das geschieht bei seitlicher Beleuchtung ebensogut, wie bei der Beleuchtung von vorn. Es zeigt sich dabei also wohl, daß die beschatteten Teile der Netzhaut ausruhen, und wenn wieder Licht auf sie fällt, dieses lebhafter empfinden. Aber die Nachwirkung der Ruhe, das negative helle Nachbild des Schattens dauert eben nicht länger als das Nachbild dunkler äußerer Objekte. Ich glaube deshalb nicht zweifeln zu dürfen, daß wir in dem schnellen Verschwinden des Gefäßschattens eben nichts anderes sehen, als in dem Verschwinden jedes starr angeschauten objektiven Bildes mit mäßigen Helligkeitsunterschieden, nur daß in jenem Falle die Schwierigkeiten der Fixation wegfallen.

Wenn nun dauernd eine Stelle der Netzhaut *A* stärker beleuchtet wird als eine andere *B*, so wird allerdings, weil *A* mehr ermüdet wird als *B*, der anfängliche Unterschied der Erregung bis zu einem gewissen Grade vermindert werden, und wir sehen ihn dabei allmählich auch für unsere Empfindung ganz und gar verschwinden, sei es nun, daß er wirklich zu klein wird, um wahrgenommen zu werden, oder, was mir wahrscheinlicher dünkt, weil unser Unterscheidungsvermögen für anhaltende Nervenerregungen viel unvollkommener ist,

als für wechselnde Erregung. Da wir nun aber in diesen Fällen unsere Beurteilung der Farbe nach dem ersten Eindruck festhalten, und über die allmähliche Veränderung desselben wegsehen, so scheinen uns bei diesem Versuch die Flächen *A* und *B* einander ähnlicher zu werden, während ihre mittlere Helligkeit ungefähr konstant erscheint. Im allgemeinen wird die hellere *A* dabei dunkler, die dunklere *B* aber heller. Eine silbergraue Tapete zum Beispiel mit dunkler grauen Blättern, an der Kupferstiche hängen, erscheint mir bei längerem Fixieren wie mit Milch übergossen.

Sind im Gesichtsfelde verschiedene Farben, so hat deren Eindruck ebenfalls nur im ersten Augenblicke volle Lebhaftigkeit. Bei anhaltendem Fixieren werden alle Farben immer dunkler und grauer, und daher einander ähnlicher. Daß sie ähnlicher werden, bemerken wir, die Veränderung der herrschenden Farbe aber bemerken wir nicht, oder nur ungenau, so lange uns die Vergleichung mit frischen Eindrücken fehlt, und so halten wir diese meist für unverändert.

Haben wir also ein weißes Feld auf rotem Grunde fixiert, und werden die beiden Farben einander immer ähnlicher, so urteilen wir, daß das Weiß rot werde. Dazu kommt, daß bei jedem Schwanken des Blicks an der Grenze beider Felder auf dem Weiß ein grünes Nachbild, auf dem Rot das von gesättigtem Rot aufblitzt, und durch den Kontrast die Wirkung verstärkt.

Daß beide Farben sich einander nähern, zeigt sich sehr deutlich, wenn man ein kleines rotes Feld auf breitem weißen Grunde fixiert. Auch dann wird, wie Fechner bemerkt hat, das Weiß nach einiger Zeit rötlich, und zwar gleichmäßig in seiner ganzen Ausdehnung. Ein zweites kleines farbiges Feld, welches weit seitlich liegt, hat keinen Einfluß auf den Gang der Erscheinung. Wählt man aber den Fixationspunkt auf der Grenze zweier kleinen verschiedenfarbigen Felder, die auf weißem Grunde liegen, so überzieht sich nach Fechner der Grund mit der Mischfarbe beider. Es zeigt sich hierbei also eine besondere Bevorzugung der Farbe, welche der gelbe Fleck empfindet, was wohl seinen Grund darin hat, daß diese am schärfsten und sichersten beurteilt wird, während die Farbenempfindung auf den Seitenteilen der Netzhaut viel unvollkommener ist.

In den bisher betrachteten Fällen, wo wir voraussetzten, daß die induzierende Farbe den größten Teil des Gesichtsfeldes einnimmt, oder wenigstens durch ihre Stärke und Lebhaftigkeit die anderen beherrscht, sind die Kontrasterscheinungen sehr konstant und deutlich, und scheinen weiter von keinen Nebenbedingungen abzuhängen. Anders ist es, wenn das Feld der induzierenden Farbe kleiner ist, so daß daneben an der Grenze des Gesichtsfeldes noch eine hinreichende Anzahl weißer und verschiedener Objekte erscheinen können. Dann sind die Kontrasterscheinungen durchaus nicht mehr so konstant, und hängen von manchen merkwürdigen Nebenbedingungen ab, die mir für die Theorie dieser Erscheinungen sehr wichtig zu sein scheinen. Ist außerhalb des induzierenden und induzierten Feldes das Gesichtsfeld dunkel, so stört dies nicht so sehr. Erst wenn das Dunkel einen sehr großen Teil des Gesichtsfeldes einnimmt, wenn man z. B. durch eine schwarze Röhre sieht, scheint das Eigenlicht der Netzhaut eine weiße Beleuchtung zu vertreten, und die Kontrasterscheinungen werden unsicher.

Wenn man ein weißes, graues oder schwarzes Papierschnitzelchen auf ein farbiges Quartblatt oder Oktavblatt legt, und dieses etwa aus einem Fuß

Entfernung betrachtet, sieht man in der Regel, genaue Fixation vorausgesetzt, nichts oder nur zweifelhafte Spuren von der Kontrastfarbe. Wenn man aber, wie in dem früher beschriebenen Versuche von Meyer, das farbige Oktavblatt mit einem Oktavblatt dünnen Briefpapiers bedeckt, erscheint auffallenderweise die Kontrastfarbe ganz deutlich und konstant, trotzdem die Farbengegensätze dadurch außerordentlich abgeschwächt werden. Auch hier ist es am vorteilhaftesten, wenn das Schnitzelchen grau ist und ungefähr dieselbe Helligkeit wie das farbige Papier besitzt.

Das farbige Papier, von dem Briefpapier bedeckt, bildet einen sehr schwach gefärbten weißlichen Grund. Wo das graue Schnitzelchen unterliegt, ist die objektive Farbe des oberen Papiers rein weiß. Jetzt sollte man erwarten, daß wenn man die objektiv weiße Stelle mit einem weißen oder hellgrauen Schnitzelchen bedeckt, welches man oben auf das Briefpapier legt, dieses auch komplementär zum Grunde erscheinen sollte. Aber wunderbarerweise ist das nicht der Fall; ein solches erscheint in seiner objektiven Farbe, und ohne Kontrast. Ja wenn man sich ein Schnitzelchen auswählt, welches genau dieselbe Farbe und Helligkeit hat, wie das Briefpapier über der grauen Unterlage, dies an die entsprechende Stelle des Briefpapiers hinschiebt, und nun anfängt die Farben beider Stellen genau miteinander zu vergleichen, so schwindet die Kontrastwirkung auch auf der weißen Stelle des Briefpapiers, wo sie früher bestand, und diese erscheint nun weiß, solange man das andere Schnitzelchen zur Vergleichung daneben hat. Ferner schwindet die Kontrastfarbe auch, wenn man die Umrisse des unterliegenden grauen Schnitzelchen auf dem Briefpapier mit schwarzen Strichen nachzeichnet. Es bleibt also die Kontrastfarbe nur so lange bestehen, als die beiden Felder durch nichts anderes voneinander geschieden sind, als durch ihren Farbenunterschied. Sobald das eine Feld als ein selbständiger Körper oder durch einen bestimmt gezeichneten Umriß abgegrenzt ist, verschwindet die Wirkung oder wird wenigstens sehr viel zweifelhafter.

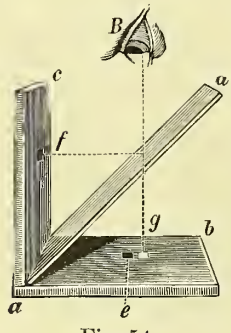


Fig. 54.

Zweitens gelingen die Versuche mit farbigen Schatten, auch wenn ein verhältnismäßig kleiner Teil des Gesichtsfeldes farbig beleuchtet ist, z. B. wenn man auf ein weißes Blatt senkrecht eine farbige Tafel aufsetzt, wodurch nur ein Teil des Papiers farbiges Licht erhält.

Drittens zeigt folgendes Verfahren von Ragona Scina die Kontrastfarben sehr schön auch bei mäßiger Ausdehnung des farbigen Feldes. Es seien *ab* und *ac* Fig. 54 zwei weiße Papierflächen, die eine horizontal liegend, die andere senkrecht, und *ad* eine farbige Glasplatte, welche gegen die beiden Papierflächen um 45° geneigt ist; *e* und *f* seien zwei schwarze Flecke. Ein Beobachter, welcher von oben bei *B* her auf den Apparat herniedersieht, erblickt die Fläche *ab* durch das gefärbte Glas hindurch, und sieht *ac* gespiegelt. Das Spiegelbild der Fläche *ac* fällt scheinbar mit der Fläche *ab* zusammen, und das Spiegelbild des schwarzen Flecks *f* liege neben dem Flecke *e*, etwa in *g*. Nun ist das Licht, welches farbige Gläser hindurchlassen, gefärbt, das was sie reflektieren, besteht teils aus rein weißem Licht, welches an der vorderen Fläche reflektiert ist, teils aus verhältnismäßig kleinen Anteilen farbigen Lichts, welches an der hinteren Fläche, oder mehrmals innerhalb der Platte reflektiert ist.

Das reflektierte Licht ist also bei dunkel gefärbten Platten fast weiß, wenigstens viel schwächer gefärbt, als das durchgelassene Licht. Demnach erhält das Auge des Beobachters von dem Spiegelbild *g* des Fleckes *f* her nur durchgelassenes, also gefärbtes Licht, was von *ab* kommt, von dem hellen Grunde teils durchgelassenes farbiges, teils reflektiertes weißliches Licht, und von dem Flecke *e* her nur reflektiertes weißliches Licht. Obgleich nun dieses letztere Licht nicht ganz weiß ist, sondern immer noch Teile gefärbten Lichtes von der Farbe des Glases enthält, erscheint es doch im Kontrast gegen die Farbe des Grundes komplementär gefärbt, der Fleck *g* dagegen natürlich in der gesättigten Farbe des Glases. Ist also z. B. das Glas grün, so erscheint *e* rosarot, *g* grün.

Auch hier muß man darauf sehen, daß der Unterschied zwischen der Helligkeit, in der *e* und der Grund erscheint, nicht zu groß wird, und deshalb bei farbigen Gläsern, die viel Licht durchlassen, die Fläche *ab* durch ein weißes Papier beschatten. Übrigens ist die Kontrastfarbe von *e* deutlicher, wenn der dem Grunde gleichnamig erscheinende Fleck *f* da ist, als wenn er fehlt. Beide werden hier unter scheinbar gleichen Bedingungen gesehen, und die Vergleichung ihres Aussehens steigert den Gegensatz. Sucht sich nun der Beobachter ein graues Papier aus, welches genau dieselbe Farbe hat, wie ihm der Fleck *e* ohne Kontrast erscheinen würde, und bringt er davon ein Schnitzelchen über die farbige Glasplatte, so daß es ihm den Fleck *e* halb verdeckt, so erscheint ein solches Schnitzelchen gar nicht oder nur zweifelhaft komplementär gefärbt, und sobald man die Farbe des Flecks *e* mit ihm vergleicht, und sie als gleich anerkennt, schwindet auch die Komplementärfarbe von *e* und verwandelt sich in ein einfaches Grau. Es ist dies ganz dieselbe Erscheinung wie bei der ersten Methode.

Ähnliche Erscheinungen, die freilich nur sehr kleine durch Kontrast gefärbte Felder, aber doch eine lebhafte und deutliche Wirkung zeigen, sind folgende. Man nehme eine schwach gefärbte etwas dicke Glasplatte etwa von gewöhnlichem grünlichen Fensterglas, und betrachte in ihr das Spiegelbild einer hellen weißen Fläche. Dabei wirft die vordere Fläche der Platte rein weißes Licht zurück, die hintere grünliches, weil letzteres der absorbierenden Wirkung des Glases ausgesetzt gewesen ist. Nun bringe man zwischen die Platte und die helle Fläche ein schmales schwarzes Stäbchen, welches in zwei Spiegelbildern erscheint, deren eines von der vorderen, eines von der hinteren Fläche der Platte reflektiert wird. Wo das von der vorderen Fläche entworfene Spiegelbild gesehen wird, empfängt das Auge des Beobachters noch grünliches Licht von der hinteren Fläche, wo das Spiegelbild der hinteren Fläche liegt, noch weißes Licht von der vorderen Fläche. Der Grund erscheint daher weiß, kaum etwas grünlich, das erstere Spiegelbild grün, das zweite durch Kontrast sehr deutlich rosarot. Noch deutlicher wird die Erscheinung, wenn man die hintere Fläche eines solchen gefärbten Glases mit Spiegelfolie belegt, und die Nachbilder unter so schiefer Inzidenz betrachtet, daß beide gleich stark erscheinen.

Ähnlich ist folgender Versuch. Man lege ein farbiges, z. B. grünes, auf ein weißes Papier (besser ein graues von gleicher Helligkeit). Nahe dem Rande, wo das grüne und weiße Feld zusammenstoßen, mache man auf jedes von beiden einen kleinen schwarzen Fleck, und setze ein Rhomboeder von Doppelspat auf diese Stelle. Durch den Kristall sieht man alle Punkte der Unter-

lage doppelt. In der Mitte erscheint ein grünweißer Streifen, wo sich das ordentliche Bild des Weiß mit dem außerordentlichen des Grün deckt. Man muß die Anordnung so treffen, daß in diesem Streifen je eines der Bilder der beiden schwarzen Flecke erscheint. In dem ordentlichen Bilde des auf dem Weiß befindlichen schwarzen Flecks fehlt Weiß, ist aber Grün vorhanden, der Fleck ist grün. In dem außerordentlichen Bilde des auf dem Grün befindlichen schwarzen Flecks fehlt Grün, ist aber Weiß vorhanden; durch Kontrast erscheint er lebhaft rosenrot.

In den zuletzt beschriebenen Versuchen hängt die Kontrastwirkung nicht mehr allein ab von einer bestimmten Verteilung der Farben im Gesichtsfelde. Wir haben gesehen, daß diese bei zwei verschiedenen leichten Abänderungen desselben Versuchs genau gleich sein kann, und doch in dem einen Falle die Kontrastwirkung eintritt, im anderen nicht. Sobald das kontrastierende Feld als ein selbständiger Körper anerkannt wurde, der über dem farbigen Grunde lag, oder auch nur durch eine hinreichende Bezeichnung seiner Grenzen als ein gesondertes Feld genügend abgeteilt war, fiel der Kontrast fort. Da also das Urteil über die räumliche Lage, über die körperliche Selbständigkeit des betreffenden Objekts entscheidend für die Bestimmung der Farbe ist, so folgt, daß die Kontrastfarbe hier nicht durch einen Akt der Empfindung, sondern durch einen Akt des Urteils entsteht. Die Art dieser Urteilsakte, durch welche wir zur Wahrnehmung von Objekten mit bestimmten Eigenschaften gelangen, wird in der dritten Abteilung genauer beschrieben werden. Da die bezeichneten Urteilsakte immer unbewußt und unwillkürlich vollzogen werden, so ist es natürlich oft schwer, auszumitteln, auf welcher Verkettung von Eindrücken das endliche Resultat beruht, und es liegt in der Natur der Sache, daß sehr verschiedenartige Umstände von Einfluß sein können. Ich will versuchen hier dergleichen Umstände zu bezeichnen, soweit ich bei der Neuheit des Gegenstandes sie aufzufinden weiß.

Die bisher beschriebenen Versuche haben etwas Gemeinsames, welches den Eintritt der Kontrastwirkung sehr zu unterstützen scheint, obgleich auch ohne diesen Umstand Kontrast zustande kommen kann. In allen diesen Fällen scheint nämlich eine farbige Beleuchtung oder eine farbige durchsichtige Decke über das Feld ausgebreitet zu sein, und die Anschauung ergibt nicht unmittelbar, daß sie auf der weißen Stelle fehlt, so daß hier nicht bloß einfach an Stelle des Weiß die Komplementärfarbe des Grundes gesetzt wird, daß man vielmehr an die Stelle des Weiß zwei neue Farben setzt, die Farbe des Grundes und deren Komplement. Am klarsten ist das Verhältnis bei der in Fig. 54 dargestellten Anordnung, wo man durch das unter 45° geneigte grüne Glas sieht. Man urteilt, daß der schwarze Fleck des unteren horizontalen Blattes rosenrot sei, aber man urteilt auch, daß man diesen Fleck wie das ganze Blatt mit seiner rosenroten Farbe durch das grüne Glas sehe, und daß die grüne Farbe, welche das Glas gibt, sich ununterbrochen über die ganze unterliegende Fläche erstreckt, auch über den dunkeln Fleck. Man glaubt also an dieser Stelle gleichzeitig zwei Farben zu sehen, nämlich das Grün, welches man der Glasplatte zuschreibt, und das Rosenrot, welches man dem dahinter liegenden Papier zuschreibt, und beide zusammen geben in der Tat die wahre Farbe dieser Stelle, nämlich Weiß. In der Tat müßte ein Objekt, welches, durch ein grünes Glas gesehen, weißes Licht in das Auge sendet, wie dieser Fleck, rosenrot sein. Bringen wir aber ein genau ebenso aussehendes weißes Objekt oberhalb

der Glasplatte an, so fällt jeder Grund weg, die Farbe des Objekts in zwei zu zerlegen, es erscheint uns weiß.

Ebenso wenn farbige Flächen mit durchscheinendem Papier bedeckt sind. Ist die Unterlage grün, so erscheint das Papier selbst grünlich gefärbt. Geht nun die Substanz des Papiers ohne sichtbare Unterbrechung über das untergelegte Grau hin, so glaubt man ein Objekt durch das grünliche Papier hindurchschimmern zu sehen, und ein solches Objekt muß wiederum rosenrot sein, um weißes Licht zu geben. Ist aber die weiße Stelle als selbständiges Objekt abgegrenzt, fehlt die Kontinuität mit dem grünlichen Teil der Fläche, so betrachtet man sie als ein weißes Objekt, welches auf dieser Fläche liegt. Ich habe schon oben im § 20 erwähnt, daß eine solche Trennung zweier Farben, die in demselben Teile des Gesichtsfeldes vorhanden sind, durch das Urteil vorkomme. Wir lernten diesen Umstand dort als ein Hindernis für das ungestörte Zustandekommen der Empfindung einer Mischfarbe kennen. Eine solche Trennung tritt sehr häufig ein, sobald die beiden Farben ungleichmäßig verbreitet sind. Man glaubt dann, wie Volkmann[1], der diese Erscheinungen zuerst erwähnt hat, es beschreibt, die eine Farbe durch die andere hin zu sehen. Die Fähigkeit, eine solche Trennung auszuführen, scheint mir auf folgendem Umstande zu beruhen. Ihre wichtigste Bedeutung haben die Farben für uns, insofern sie Eigenschaften der Körper sind, und als Erkennungszeichen der Körper benutzt werden können. Wir gehen deshalb bei unseren Beobachtungen mit dem Gesichtssinne stets darauf aus, uns ein Urteil über die Körperfarben zu bilden, und dabei die Verschiedenheiten der Beleuchtung, unter der sich ein Körper uns darbietet, zu eliminieren. Ich habe in § 20 schon erwähnt, daß wir in diesem Sinne deutlich unterscheiden zwischen einem weißen Blatte in schwacher Beleuchtung und einem grauen Blatte in starker Beleuchtung, daher wir eine gewisse Schwierigkeit finden, uns davon zu überzeugen, daß hell beleuchtetes Grau gleich sei schwach beleuchtetem Weiß. Wir müssen künstlich das starke Licht genau auf das graue Feld beschränken, so daß wir aus dem Sinneneindruck nicht entnehmen können, das Grau sei stärker beleuchtet als der Rest des Gesichtsfeldes. Erst dann erkennen wir seine Identität mit Weiß. Sowie wir nun gewöhnt und geübt sind, uns ein Urteil über Körperfarben zu bilden mit Elimination der verschiedenen Helligkeit der Beleuchtung, unter der wir sie sehen, so eliminieren wir auch die Farbe der Beleuchtung. Wir haben hinreichende Gelegenheit, dieselben Körperfarben zu untersuchen bei vollem Sonnenschein, bei dem blauen Licht des klaren Himmels, bei dem schwachen weißen Licht des bedeckten Himmels, bei dem rotgelben Licht der sinkenden Sonne, und bei dem rotgelben Licht der Kerzen. Dazu kommen noch die farbigen Reflexe der umgebenden Körper. In einem Laubwalde ist die Beleuchtung überwiegend grün, in Zimmern mit farbigen Wänden den Wänden gleichfarbig. Dieser letzteren Änderungen der Beleuchtung werden wir uns nicht einmal deutlich bewußt, und doch kann man sie mittels der farbigen Schatten oft genug nachweisen. Indem wir die gleichen farbigen Gegenstände unter diesen verschiedenen Beleuchtungen sehen, lernen wir uns trotz der Verschiedenheit der Beleuchtung eine richtige Vorstellung von den Körperfarben zu bilden, d. h. zu beurteilen, wie ein solcher Körper in weißer Beleuchtung aussehen würde, und weil uns nur die konstant bleibende Körperfarbe interessiert,

[1] Müllers Archiv für Anat. und Physiol. 1838. S. 373.

werden wir uns der einzelnen Empfindungen, auf denen unser Urteil beruht, gar nicht bewußt.

So sind wir denn auch nicht in Verlegenheit, wenn wir einen Körper durch eine farbige Decke hindurchsehen, zu scheiden, was der Farbe der Decke und was dem Körper angehört. Daß wir in den beschriebenen Versuchen dasselbe tun, auch da, wo die Decke über dem Körper gar nicht farbig ist, verursacht, oder befördert wenigstens die Täuschung, in die wir verfallen, und vermöge deren wir dem Körper eine falsche Farbe, die Komplementärfarbe des farbigen Teils der Decke zuschreiben.

Während wir aber geübt sind, in einer einfarbigen Beleuchtung die Körperfarben richtig zu erkennen, reicht unsere Übung doch nicht zu, dasselbe zu tun, wenn zwei verschiedenfarbige Beleuchtungen von zwei verschiedenen Seiten und von engbegrenzten und scharfe Schatten werfenden Lichtquellen kommen. Denn in den meisten der oben aufgezählten Fälle farbiger Beleuchtung sind die farbigen Flächen sehr breit, und das farbige Licht ist deshalb ziemlich gleichmäßig über alle Seiten der betrachteten Objekte verbreitet. Wir gewöhnen uns deshalb, von allen farbigen Flächen ohne Unterschied, soweit sie im Bereich der farbigen Beleuchtung sind, die Farbe der Beleuchtung abzuziehen, um die Körperfarbe zu finden. Dasselbe tun wir nun bei den farbigen Schatten, wo zwei farbige Beleuchtungen sich verbinden. Kommen Kerzenlicht und Tageslicht zusammen, so ist die Beleuchtung des Grundes weißlich rotgelb. Dieses Rotgelb der Beleuchtung subtrahieren wir nun auch von der Farbe des Schattens, zu dem gar kein Kerzenlicht gelangt, und halten diesen für blau, während er weiß ist. Wie in der Tat sich die Anschauung bildet, daß die farbige Beleuchtung sich bei solchen farbigen Schatten und in der durchscheinenden Papierdecke auch über den objektiv weißen Fleck hinziehe, zeigt sich namentlich, wenn kleine Unregelmäßigkeiten des Papiers die Beleuchtung fleckig machen; dann glaubt der Beobachter diese Fleckchen in der farbigen Beleuchtung zu sehen, die hier gar nicht existiert.

Weitere Beispiele, die sehr geeignet sind, unsere Fähigkeit zu zeigen, zwei Farben hintereinander gelegener Objekte voneinander zu trennen, lasse ich hier noch folgen. Das erste schließt sich an Volkmanns schon erwähnte Versuche an, der zwei farbige schmale Papierstreifen vor das Auge hielt, einen ganz nahe, den anderen in der Entfernung des deutlichen Sehens, und dabei bemerkte, daß er, statt die Mischfarbe zu sehen, die eine Farbe durch die andere hinsah. Man bringe einen grünen Schleier dicht vor die Augen, und lasse ihn hinreichend stark beleuchten, daß sich das ganze Gesichtsfeld mit einem grünen Scheine füllt, während das Muster und die Falten des Schleiers nur in einem sehr verwaschenen Zerstreuungsbilde erscheinen. Man wird ohne Schwierigkeit die Farben der dadurch gesehenen Gegenstände richtig erkennen, obgleich auf der Netzhaut sich zu allen Farben noch das grüne Licht des Schleiers mischt. Ja noch auffallender wird es, wenn nach einiger Zeit Ermüdung des Auges für das grüne Licht eintritt, dann färben sich nämlich die durch den Schleier gesehenen Gegenstände sogar rosenrot, trotz der Zumischung des grünen Lichts zu ihrem Netzhautbilde. Am besten zeigt sich dies, wenn wir nur mit dem rechten Auge durch den grünen Schleier sehen und das linke schließen. Nach kurzer Zeit sieht ein weißes Papier, durch den Schleier gesehen, nicht nur weiß, sondern sogar rötlich weiß aus. Wenn wir nun das rechte Auge schließen, das linke unbedeckte öffnen, so erscheint das Papier im Gegensatz

dazu jetzt diesem Auge grün. Abwechselnd das rechte und linke Auge öffnend, sehen wir dann mit jenem, wo das Netzhautbild des Papiers grünlichweiß ist, das Papier rötlich, mit diesem, wo das Netzhautbild weiß ist, umgekehrt das Papier grünlich.

Derselbe Erfolg tritt bei dem von SMITH[1] in Fochabers angegebenen und dann von BRÜCKE[2] veränderten und theoretisch erklärten Versuche ein. Wenn man nahe neben dem rechten Auge eine hellbrennende Flamme anbringt, oder die Sonne von rechts her das Auge bescheinen läßt, aber so, daß kein Licht direkt in die Pupille eindringt, während das linke Auge beschattet wird, so erscheinen dem rechten Auge weiße Gegenstände grünlich, dem linken rötlich gefärbt. Man sieht dies deutlich, wenn man hintereinander bald das rechte, bald das linke Auge öffnet, oder wenn man mit beiden Augen ein weißes Blatt Papier fixiert, und in die Mitte zwischen Auge und Papier ein schwarzes vertikales Stäbchen hält, welches man dann in zwei Bildern, eines dem rechten, das andere dem linken Auge angehörig, auf dem Papiere projiziert sieht. Auch dann ist das links erscheinende Bild, wo das linke Auge die Papierfläche sieht, aber nicht das rechte, rot, das andere grün. Fixiert man dagegen eine schwarze Tafel und hält in einiger Entfernung davor ein weißes Objekt, welches im Doppelbilde erscheint, so ist das rechte Bild rot, welches jezt das vom linken Auge gesehene ist, das linke grün. Dem seitlich beleuchteten Auge also erscheint Weiß grünlicher als dem nicht beleuchteten Auge. Nun dringt unter diesen Umständen Licht durch die Sklera und die Augenlider in das beleuchtete Auge, und dieses Licht ist rot, wie wir aus früheren Versuchen[3] schon wissen. Läßt man Sonnenlicht seitlich auf das Auge scheinen, so erkennt man auch die rote Farbe auf dunkeln Objekten. Betrachtet man z. B. eine Druckschrift, so erscheinen die schwarzen Buchstaben schön rot, das weiße Papier grün. Dies rote seitlich eingedrungene Licht zerstreut sich über den größten Teil des Augengrundes, und die Netzhautstellen des beleuchteten Auges, welche das Bild eines weißen Objekts aufnehmen, werden also gleichzeitig von weißem und rotem Lichte beleuchtet, empfinden aber grünlich weiß. Die grünliche Färbung wird bei längerer Fortsetzung des Versuchs immer deutlicher, weil sie von der Ermüdung des Auges für Rot abhängt. Aber sie kann bei der überwiegend roten Beleuchtung der Netzhaut nur dadurch zustande kommen, daß die schon vorher bestehende und ausgebreitete Erleuchtung des Grundes getrennt wird von dem hinzukommenden Lichte der Objekte, und das letztere grünlich erscheint, weil das Auge für rot ermüdet ist. Im Gegensatz hierzu erscheint nun im unveränderten Auge das reine Weiß rötlich.

Man betrachte ferner die Spiegelbilder der Tapeten und der Decke eines Zimmers in der gut polierten Oberfläche einer Mahagoni-Tischplatte. Akkommodiert man das Auge für die gespiegelten Gegenstände, so erscheinen diese entweder in natürlicher Farbe, oder auch oft etwas bläulich, komplementär zur Farbe der Platte. Akkommodiert man das Auge dagegen für die Platte, so sieht man, daß die Summe des Lichts, was von ihr herkommt, ganz überwiegend rotgelb ist. Die komplementäre Färbung der Spiegelbilder tritt hier, wie ich finde, namentlich dann ein, wenn das gespiegelte Licht der Objekte verhältnismäßig schwach gegen die Beleuchtung der Platte ist. Wenn dagegen bei

[1] *Edinb. Journ. of Science.* V. 52, POGG. Ann. XXVII. 494.
[2] Denkschr. der k. k. Akad. zu Wien. III. Bd. POGG. Ann. LXXXIV. 418.
[3] S. oben I S. 183.

sehr schrägem Einfall die Stärke des gespiegelten Lichts sehr zunimmt, die Holzmaserung dagegen verschwindet, so erscheinen die Spiegelbilder oft im Gegenteil rötlich, indem man dann die Trennung zu vollziehen keine Veranlassung mehr hat.

Obgleich solche Umstände, welche uns veranlassen eine Trennung des weißen Lichts in zwei Portionen zu vollziehen, den Eintritt des Kontrastes sehr begünstigen, sind sie doch nicht notwendig. Es treten nämlich ähnliche Kontrasterscheinungen auch auf in anderen Fällen, wo ein schwacher Unterschied der Farbe allein das induzierte Feld von dem induzierenden scheidet. Sehr schön sieht man sie auf dem Farbenkreisel, wenn man in einer Scheibe wie Fig. 55 schmale farbige Sektoren auf weißen Grund setzt, sie aber in mittlerer Entfernung vom Mittelpunkte durch einen aus Schwarz und Weiß zusammengesetzten Streifen unterbricht, so daß beim Umdrehen eigentlich ein grauer ringförmiger Streifen auf schwach gefärbtem weißlichen Grunde entstehen sollte. In der Tat sieht dieser Ring aber nicht grau, sondern komplementär gefärbt aus, und zwar am intensivsten, wenn er gleiche oder etwas geringere Helligkeit als der Grund hat. Ist die Breite der farbigen Sektoren groß, und dadurch die Farbe des Grundes zu intensiv, so ist die Komplementärfarbe des Ringes schwächer, oder wenigstens zweifelhafter als bei schwacher Färbung des Grundes, ebenso wenn man den grauen Ring mit zwei schmalen schwarzen Kreislinien einfaßt, die ihn scharf vom Grunde abgrenzen. Es fehlt in den letzteren Fällen die Kontrastfärbung vielleicht nicht ganz, aber sie ist mit einer erheblichen Unsicherheit des Urteils über die Farbe des induzierten Feldes verbunden, und durch Vergleichung mit einem neben dem Farbenkreisel befindlichen weißen Felde kann man leicht zu dem Resultate gelangen, daß das induzierte Feld wirklich weiß sei, während ohne die Kreislinien die komplementäre Kontrastfarbe sich mit zweifelloser Bestimmtheit der Wahrnehmung aufdrängt. Gar nichts von der Kontrastfarbe sieht man dagegen an einem weißen Papierschnitzelchen, welches man mit einer Pinzette über die grünliche Scheibe hinführt, selbst wenn es durch keinen Schlagschatten von dem grünlichen Felde abgehoben wird, und wenn man es so gegen das Licht wendet, daß seine Helligkeit genau gleich der des grauen Reifes wird, so erscheint auch dieser in der Nähe des Papierschnitzelchens plötzlich weiß, wie dieses, während die entfernteren Teile des Ringes meist gefärbt bleiben. Ist der graue Reif von schwarzen Linien eingefaßt, so erkennt man bei diesem Versuche seine Farbe als reines Grau in seiner ganzen Ausdehnung. Man kann in diesem Falle nicht sagen, daß man die eine Farbe durch die andere hindurchsähe. Aber man geht bei der Beurteilung der Farbe des Ringes von der Farbe des Grundes aus, und faßt die Farbe des Ringes als eine Abweichung von der Farbe des Grundes auf. Wenn die beiden Farben zwei verschiedenen Körpern angehören, ist kein Grund vorhanden, sie zueinander in Beziehung zu setzen. Man sucht vielmehr eine jede Körperfarbe unabhängig von jeder zufälligen Nebeneinanderstellung

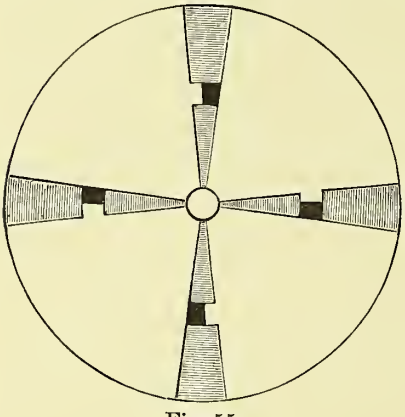


Fig. 55.

zu bestimmen. Wenn aber eine kontinuierliche ebene Fläche, die überall dieselbe Struktur und dasselbe Material zeigt, an verschiedenen Stellen verschiedene Farben zeigt, die einzigen Unterschiede dieser Stellen also in der Färbung bestehen, so müssen notwendig in unserem Urteil diese verschiedenen Farben als solche zueinander in Beziehung gesetzt und miteinander verglichen werden. Der Erfolg dieser Vergleichung ist nun, wie es der Versuch lehrt, der, daß der Unterschied der verglichenen Farben als zu groß erscheint, sei es nun, daß dieser Unterschied, wenn er der einzig bestehende ist, und allein die Aufmerksamkeit auf sich zieht, einen stärkeren Eindruck macht, als wenn er einer unter mehreren ist, und deshalb im ersteren Falle unwillkürlich für größer gehalten wird als im zweiten, sei es, daß auch in diesem Falle die verschiedenen Farben der Fläche als Abänderungen der einen Grundfarbe der Fläche aufgefaßt werden, wie sie durch darauf fallende Schatten, farbige Reflexe, oder durch Tränkung mit farbigen Flüssigkeiten, Bestäubung mit farbigen Pulvern entstehen könnten. In der Tat würde, um auf einer grünlichen Fläche einen objektiv weißgrauen Fleck zu erzeugen, ein rötlicher Farbstoff nötig sein.

Es spricht sich übrigens in den schwankenden Resultaten dieser Versuche deutlich aus, wie schwer es uns ist, Helligkeit und Farbe zweier Flächen, die nicht unmittelbar und ohne Grenzlinie aneinander stoßen, genau miteinander zu vergleichen. Schon bei den photometrischen Methoden haben wir erörtert, daß die Vergleichung nur dann genau und sicher geschieht, wenn die Grenze zwischen den zu vergleichenden Feldern in keiner anderen Weise bezeichnet ist, als durch den Unterschied der Farbe oder Beleuchtung. Je weiter sie voneinander abstehen, desto ungenauer wird die Vergleichung, so daß in einem solchen Falle dem Einfluß von Nebenumständen auf unsere Beurteilung der Helligkeit oder Farbe ein ziemlich breiter Spielraum gelassen ist. Bei den beschriebenen Versuchen ist der Unterschied zwischen der induzierten und der induzierenden Fläche unter den günstigsten Bedingungen herausgestellt, die induzierte Fläche aber mit anderen seitlich im Gesichtsfelde liegenden Flächen nur sehr unvollkommen zu vergleichen.

Es zeigt sich dies noch deutlicher bei den nun zu beschreibenden Versuchen, wo die induzierte Fläche an entgegengesetzten Seiten mit zwei verschiedenen Farben in Berührung tritt. Dann wird jene an den entsprechenden Rändern komplementär gefärbt, oder wenn die induzierte Fläche mit einem Rande an eine dunklere, mit dem anderen an eine hellere Fläche stößt, erscheint der erstere Rand heller, der letztere dunkler. Diese Kontrasterscheinungen sind aber ebenfalls nur dann deutlich, wenn das induzierende vom induzierten Felde eben nur durch den Unterschied der Farbe oder der Helligkeit geschieden ist, und keine andere Begrenzung existiert.

Man kann die Versuche leicht mit der transparenten Papierdecke ausführen. Man klebe ein Blatt grünen und rosenroten Papiers zusammen, so daß man ein Blatt erhält, welches zur Hälfte grün, zur Hälfte rosenrot ist. Am Orte der Grenzlinie zwischen beiden Farben befestige man ein Streifchen grauen Papiers, und lege über das ganze ein ebenso großes Blatt dünnen Briefpapiers. Es wird nun der graue Streifen, wo er an das Grün stößt, rosenrot, und wo er an Rot stößt, grün erscheinen, in seiner Mitte gehen die beiden Farben ineinander über durch einen unbestimmten Farbenton, der wohl eigentlich Grau ist, aber doch nicht bestimmt von uns als solches anerkannt werden könnte. Die Erscheinung ist viel lebhafter, wenn die Längsrichtung des grauen Streifens

quer zur Trennungslinie der Farben steht. Dann kann der Teil des Grau, welcher in das Grün hineinragt, ebenso lebhaft rosenrot erscheinen, wie der rosenrote Grund der anderen Seite. Schwächer, aber doch deutlich erkennbar ist die Kontrastfarbe, wenn die mittlere Längslinie des grauen Streifens gerade auf der Trennungslinie der Farben liegt. Dann erscheinen die Seitenränder des Grau mit einem schmalen nach der Mitte hin verwaschenen Saume der Komplementärfarbe gefärbt.

Ähnliche Wirkungen erhält man, wenn man dünne Papierblätter treppenförmig übereinanderlegt, so daß an dem einen Rande der Papierschicht nur ein Blatt hervorsieht, daran ein Streifen stößt, wo sich zwei decken, dann drei usw. Läßt man Licht durch eine solche Lage von Blättern scheinen, so ist natürlich innerhalb jeder Stufe die objektive Helligkeit konstant, doch erscheint jede Stufe dunkler an dem Rande, wo sie an die nächst hellere anstößt, und heller, wo sie an die nächst dunklere stößt.

Fig. 56.

Viel schöner und feiner abgestuft lassen sich aber alle diese Erscheinungen auf dem Farbenkreisel hervorbringen. Man gebe den Sektoren des Farbenkreisels die nebenstehende Form der Fig. 56, und mache sie weiß und schwarz, so erscheinen beim Umdrehen mehrere konzentrische Ringe, von denen die äußeren immer heller sind, als die nächstliegenden inneren. Innerhalb eines jeden solchen Ringes ist die Winkelbreite der schwarzen Flächenstücke konstant, also auch die Helligkeit bei schnellem Umdrehen; nur von einem zum anderen Ringe wechselt die Helligkeit. Und doch erscheint jeder Ring nach innen zu, wo sich der nächst dunklere anschließt, heller, nach außen zu, wo sich der nächst hellere anschließt, dunkler. Sind die Helligkeitsunterschiede der Ringe sehr klein, so sieht man zuweilen kaum, daß die inneren Ringe dunkler als die äußeren sind, es fällt vielmehr nur der periodische Wechsel von Hell und Dunkel an den Rändern in die Augen.

Nimmt man statt Weiß und Schwarz verschiedene Farben, so erscheint jeder Ring am äußeren und inneren Rande verschieden gefärbt, während doch objektiv die Farbe jedes einzelnen Ringes in seiner ganzen Breite dieselbe ist. Jede einzelne von den gemischten Farben tritt an demjenigen Rande jedes Ringes stärker hervor, wo ein anderer Ring anstößt, der weniger von dieser Farbe enthält. Hat man also z. B. Blau und Gelb gemischt, und überwiegt das Blau in den äußeren Ringen, Gelb in den inneren, so erscheint jeder Ring am äußeren Rande gelb, am inneren blau, und wenn die Farbenunterschiede der einzelnen Ringe überhaupt sehr gering sind, kann auch hier wieder die Täuschung eintreten, daß die wirklich vorhandenen Unterschiede der Farbe der verschiedenen Ringe verschwinden, und die abwechselnd blaue und gelbe Kontrastfärbung der Ränder auf einen gleichmäßig gefärbten Grund aufgetragen zu sein scheint. Sehr bezeichnend ist es auch, daß in diesen Fällen gewöhnlich die Mischfarbe nicht zur Anschauung kommt, man vielmehr die beiden gemischten Farben getrennt neben und durcheinander zu sehen glaubt.

Diese so auffallenden Kontrastwirkungen verschwinden aber, wenn man die Grenze zwischen je zwei Ringen durch feine schwarze Kreislinien bezeichnet. Dann erscheint jeder Ring, wie er wirklich ist, in seiner ganzen Breite gleich hell und gleich gefärbt. Auch hier ist es wieder von entscheidendem Einflusse, daß die verschiedenen Felder Teile einer, von der Färbung abgesehen, durchaus kontinuierlichen und gleichartigen Fläche seien. Auch hier haben wir es also nicht mit Veränderungen der Empfindung, sondern der Beurteilung zu tun. Die Beleuchtungsunterschiede der verschiedenen Teile dieser Fläche werden als die einzigen wahrnehmbaren Unterschiede wieder besonders hervorgehoben, und da diejenigen zweier unmittelbar benachbarter Flächenelemente deutlicher und sicherer wahrnehmbar sind, als die von entfernteren, so drängen sich namentlich die Unterschiede der Beleuchtung längs der Ränder je zweier Felder der Wahrnehmung auf, und erscheinen als die am sichersten und deutlichsten wahrnehmbaren größer als die unsicher wahrnehmbaren zwischen je zwei mittleren Teilen zweier Felder. Da in der Mitte jedes Feldes bei den beschriebenen Versuchen kein plötzlicher Sprung der Beleuchtung existiert, welcher wahrgenommen werden könnte, so muß der Schein entstehen, daß die Farbe des einen Randes durch die Mitte des Feldes allmählich in die des anderen übergeht. Macht man aber in der Mitte des induzierten Feldes einen schwarzen Strich, oder legt man ein graues Feld, dessen Hälften ungleich hell und durch eine scharfe Grenzlinie getrennt sind, zwischen zwei farbige, so gehen die komplementären Färbungen von jeder Seite her bis an diese Grenzlinie vor, und scheiden sich an dieser. Sind die Farbenunterschiede des induzierten und der induzierenden Felder so groß, daß zwischen allen Punkten derselben der Farbenunterschied zweifellos wahrnehmbar ist, so verschwindet die Kontrastwirkung, oder wird wenigstens viel zweifelhafter. Findet noch irgend eine andere Abgrenzung des induzierten Feldes statt, so wird der Unterschied seiner Färbung von der des induzierenden viel unsicherer wahrgenommen, und der Kontrast schwindet ebenfalls, oder wird schwächer.

*Nachtrag von Helmholtz aus der 1. Auflage.*

Burckhardt hat eine Reihe von Versuchen über die Kontrastfarben in Nachbildern angestellt, welche im allgemeinen außerordentlich lebhaft sind, weil die Bedingungen für die Erzeugung des Kontrastes hier besonders günstig sind. Dergleichen Fälle sind oben auf S. 207 und 236 erwähnt. Das Nachbild von Weiß, welches von einfarbigem Grunde umgeben ist, erscheint diesem Grunde gleichfarbig. Stoßen an das weiße Feld zwei verschiedene Farben in gleicher Ausdehnung an, so erscheint das Nachbild des Weiß in der Mischfarbe der beiden Farben des Grundes. Entwirft man das Nachbild auf farbigen Grund, so mischt sich der Farbe dieses Grundes noch die hinzu, welche das Nachbild auf weißem Grunde zeigen würde. Sehr hübsch ist folgender Versuch. Eine Farbenscheibe mit zwei farbigen Sektoren fixiert man, während sie still steht. Dann fängt man plötzlich an zu drehen, während man fortfährt zu fixieren. Man sieht das Nachbild dann auf der Scheibe in umgekehrter Färbung der Sektoren. [Schluß des Nachtrags.]

Von den früheren Beobachtern ist in den theoretischen Erklärungen der Kontrasterscheinungen immer vorausgesetzt worden, daß die Reaktionsweise der Nerven, die Empfindung, in den induzierten Teilen der Netzhaut verändert sei, daß die Kontrasterscheinungen also in gewissem Sinne in das Gebiet der Mit-

empfindungen gehörten, zu welchen viele Forscher auch die Irradiation rechneten. In gewissem Sinne hatte man allerdings Recht von veränderter Empfindung zu sprechen, insofern man bei den Beobachtungen den sukzessiven Kontrast nicht genau von dem simultanen getrennt hatte, und also allerdings eine Änderung der Empfindung durch Nachbilder eintreten konnte. Ich habe hier, so viel ich weiß, die Trennung des sukzessiven und simultanen Kontrastes zuerst methodisch für alle Fälle durchzuführen gesucht, und gefunden, daß in den Fällen, wo die induzierende Farbe nicht durch ihre Ausdehnung und Lichtstärke alle anderen überwiegt, das Auftreten der Kontrastfarbe von Umständen abhängt, die nur durch die psychischen Tätigkeiten, durch welche es zu Gesichtswahrnehmungen kommt, festgestellt werden. Wenn dem induzierten Felde körperliche Selbständigkeit zugeschrieben wird, kommt es unter der genannten Bedingung meist nicht zur Wahrnehmung der Kontrastfarbe. Die Art der hierbei vorkommenden Täuschung des Urteils habe ich schon oben bezeichnet. Es handelt sich immer um Fälle, wo eine gewisse Breite des Zweifels über die Art der induzierten Farbe besteht, weil ein genauer Vergleich derselben mit Weiß nicht ausführbar ist, und wo deshalb unser Wahrnehmungsvermögen durch Nebenumstände veranlaßt wird, die betreffende Farbe bald an die eine, bald an die andere Grenze des Intervalls zu verlegen, innerhalb dessen die Unsicherheit besteht. Denjenigen meiner Leser, welche den Einfluß der psychischen Tätigkeiten auf unsere Sinneswahrnehmungen noch wenig kennen, wird es vielleicht unglaublich vorkommen, daß durch psychische Tätigkeit eine Farbe im Gesichtsfelde erscheinen soll, wo keine ist; ich muß diese bitten, ihr Urteil zu suspendieren, bis sie die Tatsachen des dritten Abschnittes dieses Werkes, der die Sinneswahrnehmungen behandeln wird, kennen gelernt haben, wo sie viele Beispiele ähnlicher Art finden werden. Es leitet uns der vorliegende Paragraph zur Lehre von den Gesichtswahrnehmungen schon hinüber. Ich habe ihn in der Lehre von den Empfindungen noch stehen lassen, weil der Kontrast bisher immer dort seine Stelle fand, und die gewöhnlichsten Erscheinungen, die zu ihm gehören, gemischter Natur sind.

Da die meisten Kontrasterscheinungen von der Breite der Unsicherheit in der Beurteilung der Intensität und Qualität unserer Gesichtsempfindungen abhängig sind, so muß notwendig Übung in der Beurteilung der Farben einen beträchtlichen Einfluß auf das Eintreten des Kontrastes haben. So wie ein in der Beurteilung räumlicher Größen geübtes Auge sich vor manchen Täuschungen hüten wird, in die ein ungeübtes verfällt, wird es auch bei den Farbenbestimmungen geschehen, und ich glaube deshalb, daß geübte Augen den Kontrast im allgemeinen weniger lebhaft sehen werden, als ungeübte. Meine Versuche wurden mir von Personen, die in optischen Beobachtungen erfahren waren, leicht bestätigt. Dagegen sind in manchen Büchern die Kontrasterscheinungen so beschrieben, daß ich annehmen muß, sie seien manchen Beobachtern viel leichter sichtbar und viel häufiger als mir.

Während nun die Kontrasterscheinungen bei begrenztem induzierendem Felde durch die Abhängigkeit der Färbung von anderen nur durch Beurteilung festgestellten Umständen keinen Zweifel über ihre Deutung lassen, sind die Kontraste bei unbegrenztem induzierendem Felde viel konstanter, und würden deshalb eher die Deutung zulassen, daß sie durch Veränderungen der Empfindung selbst hervorgerufen seien. Indessen sind offenbar bei diesen letzteren die Bedingungen noch viel ungünstiger als bei den ersten, um die empfundene Farbe

des induzierten Feldes sicher bestimmen zu können, weil eben die Vergleichung der Farbe dieses Feldes mit anderem Weiß ganz fehlt, oder wenigstens viel beschränkter ist. Außerdem zeigen die Kontraste auf unbegrenztem induzierendem Felde, wenn sie auch konstanter auftreten, doch in ihren Intensitätsverhältnissen eine vollständige Analogie mit denen des begrenzten Feldes. Es wird in allen diesen Fällen die Kontrastfarbe in voller Intensität schon durch eine sehr kleine Intensität der induzierenden Farbe hervorgerufen und durch Steigerung der letzteren nicht oder wenig verstärkt. Dagegen kann sie eine deutliche Verstärkung erleiden, sobald wirklich die Empfindung durch Nachbilder verändert wird. Sie wird endlich durch das Urteil in voller Intensität festgehalten, sobald man alle anderen Farben aus dem Gesichtsfelde entfernt. Ich zweifle deshalb nicht, daß auch bei großem induzierendem Felde die Deutung der Erscheinungen die nämliche sein müsse, wie bei kleinem, daß auch hier die Kontrastfarbe nur durch eine Tätigkeit des Urteils gesetzt sei, wenn ich auch in diesen Fällen noch keinen so genügenden Beweis für diese Deutung liefern kann.

Die Kontrasterscheinungen sind dem Leonardo da Vinci größtenteils schon bekannt gewesen. Er sagt, daß unter allen Farben von gleicher Vollkommenheit jene die schönsten sind, welche neben den entgegengesetzten stehen, also Weiß neben Schwarz, Blau neben Gelb, Rot neben Grün[1]. Später waren es namentlich die farbigen Schatten, welche vor allen anderen Kontrasterscheinungen die Aufmerksamkeit in Anspruch nahmen. Otto v. Guericke[2] kannte sie, und suchte sie zu benutzen, um den Aristotelischen Satz, daß Weiß und Schwarz gemischt Blau geben könnten, zu beweisen. Aber erst Buffon[3] lenkte die allgemeinere Aufmerksamkeit auf sie; er beobachtete sie indessen nur immer zufällig bei Sonnenaufgang oder Untergang, wo sie bald blau, bald grün waren. Abbé Mazeas[4] erzeugte sie durch das Licht des Mondes und einer Kerze. Auch er glaubte die Farben aus einer Verminderung des Lichtes erklären zu können. Dagegen suchten Melville[5] und Bouguer[6] die Erscheinungen aus Newtons Farbentheorie zu erklären. Man hielt die Farben für objektiv, weil in der Tat die blauen Schatten, wenn sie von dem Lichte des blauen Himmels erleuchtet werden, objektiv blau gefärbt sind. Daß wirklich das blaue Licht des Himmels in vielen Fällen Grund der blauen Schatten ist, zeigte namentlich Beguelin[7]. Rumford[8] scheint zuerst die subjektive Natur der Farbe des einen Schattens entdeckt zu haben, indem er ihn durch ein enges Rohr betrachtete; derselben Ansicht schlossen sich Goethe[9], Grotthuss[10], Brandes[11], Tourtual[12] an. Dagegen stritten noch längere Zeit andere Beobachter für die objektive Natur beider Schattenfarben, so v. Paula Schrank[13], der die Farbe des blauen Schattens der Diffraktion zuschrieb, Zschokke[14], Osann[15] und Pohlmann[16],

[1] *Trattato della pittura.* Kap. CC. — Farbige Schatten in Kap. CLVI. und CCCXXVIII.
[2] Exper. Magdeb. S. 142.
[3] *Mém. de l'Acad. de Paris.* 1743. p. 217.
[4] Abh. der Akad. zu Berlin 1752.
[5] *Edinb. Essays.* Vol. II. p. 75.
[6] *Traité d'Optique.* p. 368.
[7] *Mém. de l'Acad. de Berlin.* 1767. p. 27.
[8] *Philos. Transact.* LXXXIV. 107; Grens neues Journal der Physik. II. 58.
[9] Farbenlehre. S. 27.
[10] Schweiggers Beiträge zur Chemie und Physik. III. 14.
[11] Gehlers neues Wörterbuch. Art.: Farbe.
[12] Die Erscheinungen des Schattens. Berlin 1830.
[13] Münchener Denkschr. 1811 und 12. S. 293, und 1813. S. 5.
[14] Unterhaltungsblätter für Natur und Menschenkunde. 1826. S. 49.
[15] Pogg. Ann. XXVII. 694; XXXVII. 287; XLII. 72.
[16] Ebenda. XXXVII. 319—341.

welcher sich Beguelins Ansicht wieder anschloß. Dagegen führte namentlich Fechner[1] den Beweis von der subjektiven Natur dieser Erscheinungen, er wies unter anderem auch nach, wie durch eine Tätigkeit des Urteils die einmal hervorgetretene Kontrastfarbe festgehalten werden könne, und bereicherte die Zahl der Beobachtungen, doch wagte er noch keine Theorie dieser Erscheinungen aufzustellen. Plateau[2] zog die Kontrasterscheinungen mit in seine Theorie der Nachbilder hinein; wie die Netzhaut der Zeit nach in entgegengesetzte Zustände überginge, sollte sie es auch der Fläche nach tun, so daß zunächst um die erregte Stelle die gleiche Phase stattfinde, welche sich in den Irradiationserscheinungen kund gebe, und in weiterer Entfernung die entgegengesetzte, welche den Kontrast hervorrufe.

Die Ansicht, daß die Kontrasterscheinungen sich durch Nachbilder erklärten, wurde schon von Jurin[3] vorgetragen, später von Brandes. Sie war für einen Teil der Erscheinungen richtig, aber nicht für alle, und Fechner namentlich zeigte, daß auch ohne vorhergehende Ermüdung der betreffenden Netzhautstelle Kontrastfarben entstehen könnten.

Die Veränderungen der einzelnen Farben bei ihrer Zusammenstellung mit anderen beschrieb Chevreul[4] genau. Die komplementären Spiegelbilder an gefärbten Glasplatten wurden von Brandes[5] und Osann beschrieben; die beste Form gab Dove[6] diesem Versuche, welche später Ragona Scina[7] noch abänderte. Die Fälle, wo das induzierte Feld dem induzierenden gleich gefärbt wird, fanden Fechner und Brücke[8]. Daß ein schwacher Unterschied der Farben vorteilhafter sei als ein starker, zeigte H. Meyer[9]. Übrigens schlossen sich die neueren Beobachter fast alle der Ansicht von Plateau an, daß der Kontrast auf einer Veränderung der Empfindung beruhe. Ich selbst habe im vorliegenden Paragraphen die verschiedenen konkurrierenden Ursachen vollständiger als bisher zu trennen gesucht, und mich bemüht zu zeigen, daß der reine simultane Kontrast auf einer Veränderung nicht der Empfindung, sondern der Beurteilung beruhe.

---

1651. Leonardo da Vingi († 1519), *Trattato della pittura.* Kap. CLVI, CC, CCCXXVIII.
1672. Otto v. Guericke, Experimenta nova, ut vocantur, Magdeburgica de vacuo spatio. Amstelod. 1672. p. 142.
1738. Jurin, *Essay on distinct and indistinct vision.* p. 170.
1743. G. de Buffon, *Sur les couleurs accidentelles. Mém. de Paris.* 1743. p. 217.
1752. Mazeas, *Mém. de l'Acad. de Berlin.* 1752.
1760. Bouguer, *Traité d'optique sur la gradation de la lumière.* Paris 1760. p. 368.
Melville, *Observations on light and colours. Essays and observations. Phys. and Litt.* Edinburgh II. 12 und 75.
1767. Beguelin, *Mémoire sur les ombres colorées. Mém. de l'Acad. de Berlin.* 1767. p. 27. 1783. p. 52.
1778. v. Gleichen genannt Russworm. Von den Farben des Schattens. Act. Acad. Mogunt. 1778. 308.
1782. H. F. T., *Observations sur les ombres colorées.* Paris 1782.
1783. Flaugergues, *Sur les ombres colorées. Mém. de Berlin.* 1783. p. 52.
1783. Opoix, *Journal de Physique.* 1783 Dec.
Petrini, *Mem. di Mat. e di Fisica della Soc. Ital.* XIII. p. 11.
1787. Carvalho e Sampago, *Tratado das Colores.* Malta 1787.

---

[1] Ebenda. XLIV. 221. L. 433.
[2] *Ann. de chim. et de phys.* LVIII. 339. Pogg. Ann. XXXII. 543; XXXVIII. 626.
[3] *Essay on distinct and indistinct vision.* p. 170.
[4] *Mém. de l'Acad.* XI. 447—520.
[5] Gehlers neues Wörterbuch. Art. Farbe. IV. 124.
[6] Poggendorffs Ann. XLV. 158.
[7] Racc. fisico-chimici. II. 207.
[8] Denkschr. d. Wiener Akademie. III. 3. Oktober 1850.
[9] Poggendorffs Ann. XCV. 170.

1805. Prieur, Bemerkungen über die Farben und einige besondere Erscheinungen derselben. Gilb. Ann. XXI. S. 315. *Ann. de Chim.* LIV. p. 1.
Hassenfratz, *Sur les ombres colorées. Journ. de l'école polytechn.* Cah. XI.
1810. v. Goethe, Zur Farbenlehre. S. 27.
1811. Grothuss, Über die zufälligen Farben des Schattens. Schweiggers Journal III. 14.
v. Paula Schrank, Über die blauen Schatten. Abb. d. Münchener Akad. 1811. p. 293 und 1813. p. 57.
1820. Muncke, Über subjektive Farben und gefärbte Schatten. Schweiggers Journ. XXX. 47.
1826. Zschokke, Die farbigen Schatten, ihr Entstehen und ihr Gesetz. Aarau 1826 Unterhaltungsblätter für Natur- und Menschenkunde 1826. S. 49.
1827. Brandes, Art.: Farbe in Gehlers neuem physik. Wörterbuch IV. 124.
Treschel, *Biblioth. univers.* XXXII. 3.
1830. Tourtual, Über die Erscheinungen des Schattens und deren physiologische Bedingungen, nebst Bemerkungen über die wechselseitigen Verhältnisse der Farben Berlin 1830.
Lehot in: *Annales des sciences d'observation par* Saigey et Raspail 1830. III. 3.
Froriep's Notizen XXVIII. p. 177.
1832. Osann, Vorrichtung zur Hervorbringung komplementärer Farben und Nachweis ihrer objektiven Natur. Poggendorff's Ann. XXVII. 694. XXXVII. 287. XLII. 72.
Smith von Fochabers in *Edinb. Journ. of Science.* V. 52.
Brewster, Über den Versuch von Smith in Poggendorff's Ann. XXVII. 494.
Chevreul, *Sur l'influence, que deux couleurs peuvent avoir l'une sur l'autre, quand on les voit simultanément. Mém. de l'Acad. de Paris.* XI. 1832. — *De la loi du contraste simultané des couleurs.* Strasbourg 1839.
1834. J. Müller, In seinem Archiv für Anat. und Physiol. 1834. S. 144. Lehrbuch d. Physiol. 2. Aufl. II. 372.
Plateau in: *Ann. de chim. et de phys.* LVIII. 339. Poggendorff's Ann. XXXII. 543. XXXVIII. 626.
1836. Pohlmann, Theorie der farbigen Schatten. Poggendorff's Ann. XXXVII. 319—341.
1838. *Fechner, Über die Frage, ob die sogenannten Farben durch den Kontrast objektiver Natur seien. Poggendorff's Ann. XLIV. 221—245.
Dove, Über subjektive Komplementärfarben. Poggendorff's Ann. XLV. 158.
1840. *Fechner, Tatsachen, welche bei einer Theorie der Farben durch den Kontrast zu berücksichtigen sind. Poggendorff's Ann. L. 433.
1847. D. Ragona Scina, *Su taluni fenomeni che presentano i cristalli colorati. Racc. fis. chim.* II. 207.
1851. E. Brücke, Untersuchungen über subjektive Farben. Wiener Denkschr. III. 95. Poggendorff's Ann. LXXXIV. 418. *Arch. d. sc. phys. et natur.* XIX. 122.
1852. A. Beer, Über das überzählige Rot im Farbenbogen der totalen Reflexion (Kontrastfarbe). Poggendorff's Ann. LXXXVII. 113—115. *Cosmos.* II. 95.
1855. H. Meyer, Über Kontrast- und Komplementärfarben. Poggendorff's Ann. XCV. 170—171. *Ann. de chim.* (3) XLV. 507. *Phil. Mag.* (4) IX. 547.
1858. Chevreul, *Note sur quelques expériences de contraste simultané des couleurs. C. R.* XLVII. 196—198. Dingler J. CXLIX. 435—436.
1859. Nardo, *Nota sulle ombre colorate ottenute col solo concorso di luce bianche. Cimento* IX. 352—356. *Atti dell' Istit. Veneto.* V. Zeitschr. für Chemie. 1860. p. 18—20.
— Ragona, *Su taluni fenomeni di colorazione soggettiva. Atti dell' Acad. Palermit.* III. Zeitschr. für Chemie. 1859. p. 20—24.
1860. G. Th. Fechner, Über die Konstrastempfindung. Leipzig. Ber. 1860. S. 71—145.
— Osann, Über Ergänzungsfarben. Würzb. Zeitschr. I, 61—77.
— Fechner, Einige Bemerkungen gegen die Abhandlung Prof. Osanns über Ergänzungsfarben. Leipz. Ber. 1860. 146—165.
— J. J. Oppel, Über farbige Schatten bewirkt durch weißes Licht. Jahresber. des Frankf. Vereins. 1859—1860. S. 65—69.
1861. Rossolini, *Sulle ombre colorate. Atti dell' Istit. Lombardo.* II, 318—321.
1862. H. Aubert, Beiträge zur Physiologie der Netzhaut. Abhandl. der schlesischen Gesellsch. 1861 (1), S. 49—103. S. 344.
— G. Th. Fechner, Über den seitlichen Fenster- und Kerzenversuch. Leipz. Ber. 1862. S. 27—56.
1865. Fr. Burckhardt, Die Kontrastfarben im Nachbilde. Basler Verhandl. 1865.

## § 25. Verschiedene subjektive Erscheinungen.

Es bleiben noch einige subjektive Gesichtserscheinungen zu beschreiben übrig, deren Erklärung für jetzt unmöglich oder wenigstens ziemlich zweifelhaft ist, und welche deshalb in die vorausgegangenen Paragraphen nicht eingereiht werden konnten.

1. Erscheinungen des gelben Flecks. Der gelbe Fleck bildet eine in vielen Beziehungen ausgezeichnete Stelle der Netzhaut. Die Eigentümlichkeiten seiner anatomischen Struktur sind Bd. I S. 23 u. 24 beschrieben. Ferner zeichnet er sich physiologisch aus durch die Schärfe in der Wahrnehmung kleiner Bilder, worin sein Zentrum, die Netzhautgrube, alle anderen Stellen der Netzhaut bei weitem übertrifft. Dadurch erhält er auch seine Bedeutung als Fixationspunkt. Wie er im entoptischen Bilde sichtbar gemacht werden kann, ist schon in § 15 Bd. I S. 183—186 auseinandergesetzt; er zeichnet sich bei dieser Beobachtungsweise dadurch aus, daß die Gefäße in seinem Zentrum fehlen, und zweitens durch den Schatten, den die seitlichen Abhänge der Netzhautgrube bei schiefer Beleuchtung werfen. Betreffs der Empfindungen dieser Netzhautstelle haben wir schon erwähnt, daß sie bei der elektrischen Durchströmung des Auges je nach der Strömungsrichtung bald dunkel auf hellem Grunde, bald hell auf dunklem Grunde sich abzeichnet, ferner daß sie bei mäßig schnell intermittierendem Lichte sich durch eine eigentümliche sternförmige Zeichnung in den schillernden Figurenmustern der Netzhaut hervorhebt.

Es ist jetzt noch zu erwähnen, daß sie auch bei gleichmäßig ausgebreiteter, namentlich blauer Beleuchtung sich eigentümlich abzeichnet. Es erscheinen hierbei verschiedene Teile des gelben Flecks, nicht immer alle gleichzeitig, unter verschiedenen Bedingungen verschieden deutlich. Das Zentrum des gelben Flecks ist die Netzhautgrube, in deren Grunde die Netzhaut sehr dünn, durchsichtig und ungefärbt ist. Ihr Durchmesser ist nach Koelliker 0,18 bis 0,225 mm. Ihr Abstand vom hinteren Knotenpunkte des Auges ist 15 mm, also im Mittel 75 mal so groß als ihr Durchmesser. Ihre scheinbare Größe im Gesichtsfelde ist also ein Kreis, dessen Durchmesser 40—50 Minuten ist. Sie erscheint, wenn sie sichtbar wird, gewöhnlich als ein gut begrenzter regelmäßiger Kreis. Die Netzhautgrube umgebend erscheint oft ein dunkler Hof, dessen Größe ungefähr der gefäßlosen Stelle des gelben Flecks entspricht, wie sie erscheint, wenn man die Gefäße entoptisch sichtbar macht. Die äußere Begrenzung dieses Hofs, den wir den gefäßlosen nennen wollen, ist verwaschen, sein Durchmesser ungefähr dreimal größer als der der Netzhautgrube, beträgt also etwas über 2 Winkelgrade. Bald erscheint seine Grenze ziemlich kreisförmig, namentlich bei schwachem Lichte, bald einem Rhombus ähnlicher, dessen längere Diagonale horizontal liegt. In letzterer Weise erscheint sie mir selbst namentlich bei stärkerem Licht. Es entspricht diese Stelle anatomisch dem mittleren intensiv gelbgefärbten Teile des gelben Flecks, dessen horizontaler Durchmesser von H. Müller in zwei Augen gleich 0,88 und 1,5 mm, der vertikale gleich 0,53 und 0,8 gefunden wurde. Übrigens breitet sich die gelbe Färbung noch viel weiter aus, ist aber schwach und verwaschen.

Endlich sieht man bei stärkerem Licht den dunklen gefäßlosen Hof noch umgeben von einem hellen Hofe, dessen äußere Begrenzung sehr unbestimmt bezeichnet ist, und die mir selbst ebenfalls mehr rhombisch, als kreisförmig erscheint. Ihre beiden Durchmesser sind etwas dreimal so groß, als die des

dunklen gefäßlosen Hofes. Ein anatomisch wohlbegrenztes Substrat dieser Stelle läßt sich nicht bezeichnen. Die gelbliche verwaschene Färbung der äußeren Teile des gelben Flecks fällt mit diesem hellen Hofe einigermaßen zusammen. Doch läßt sich über die Kongruenz ihrer Größe nichts sagen, da die Ausdehnung der schwachen gelben Färbung zu breite individuelle Abweichungen zeigt. Vielleicht verdankt dieser äußerste helle Hof seinen Ursprung auch nur einer Kontrastwirkung, wir können ihn nach seinem Entdecker, dem er kreisförmig erschien, den Loeweschen Ring nennen.

Loewe[1] entdeckte diesen Ring, indem er durch eine klare seladongrüne Auflösung von Chromchlorid nach einer hellen Fläche sah. Der Ring erschien im Vergleich zu dem grünlichen Grunde violett, den mittleren dunkleren Hof umgebend, so daß ihn Haidinger mit einem Abbilde der Iris vergleicht, die die dunkle Pupille umgibt. Haidinger zeigte, daß dichromatische Mittel zur Herstellung der Ringe nicht nötig seien, daß sie im homogenen Blau des prismatischen Spektrums erscheinen, und auch in gemischtem Licht, welches genügend Blau enthält. In letzterem zeigen sie verschiedene Farbenunterschiede von dem übrigen Grunde, je nach der Beschaffenheit der dem Blau zugemischten Farben. Verschiedenen Augen scheint dieser Ring mit verschiedener Deutlichkeit zu erscheinen, so daß viele ihn überhaupt nicht sehen können. Ich selbst sehe ihn nur bei einer gewissen mittleren Helligkeit, derjenigen etwa, die uns zum Schreiben und Lesen bequem ist. Wenn ich vor die Augen ein blaues Glas halte, sie durch Verschluß der Lider eine Weile ausruhe, und dann durch das Glas nach einer weißen Papierfläche sehe, erblicke ich deutlich den gefäßlosen Hof, als einen rhombischen schattigen Fleck, umgeben von einem rhombischen, heller blauen Streifen, dem Loeweschen Ring. Bei etwas größerer und etwas kleinerer Helligkeit erscheint mir der Loewesche Ring schmaler, bei noch größeren Abweichungen der Helligkeit sehe ich nur den dunklen gefäßlosen Hof ohne helle Umsäumung.

Der dunkle gefäßlose Hof ist der konstanteste Teil der Erscheinung. Sein Verhalten ist zuerst von Maxwell[2] genauer untersucht worden. Wenn man homogenes Licht anwendet, erscheint er nach ihm nur im Blau, nicht in anderen Farben. Übrigens erscheint er auch in gemischten Farben, wenn sie Blau reichlich enthalten, namentlich auch, freilich schwach, im Weiß. Wenn man das ausgeruhte Auge nach einer blauen Fläche hinwendet, erscheint er, und schwindet bald wieder, bei heller Beleuchtung schneller als bei schwacher. Maxwell empfiehlt abwechselnd vor das Auge blaue und gelbe Gläser oder blaue und gelbe Papiere zu bringen. Im Blau erscheint der Fleck, im Gelb verschwindet er. Ich selbst sehe ihn am schönsten am Abendhimmel, wenn die ersten Sterne zu erscheinen anfangen, und man sich schon längere Zeit im Freien befindet, so daß die Augen hinreichend ausgeruht sind. Wenn man sie einige Augenblicke schließt, und dann nach dem Himmel hin öffnet, sieht man den gefäßlosen Hof einige Zeitlang sehr deutlich, die Netzhautgrube in seinem Innern auch häufig und zwar als einen etwas helleren Fleck von reinerem Blau, ziemlich scharf begrenzt. Dabei ist es eigentümlich, daß, wie schon Maxwell bemerkt hat, der Lichteindruck in den zentralen Stellen der Netz-

[1] Haidinger in Pogg. Ann. LXX. 403. LXXXVIII. 451. Wiener Sitzungsber. IX. 240.

[2] *Athenäum.* 1856. p. 1093. *Edinb. Journ.* (2) IV. 337. *Inst.* 1856. p. 424. *Rep. of British Association.* 1856. II. 12.

haut einen Moment später zur Empfindung kommt, als in den peripherischen Teilen. Maxwell ließ zu dem Ende eine Reihe dunkler Streifen vor einem blauen Felde mit gewisser Geschwindigkeit vorbeigehen. Man sieht es aber auch beim einfachen Aufschlagen der Augen. Das Dunkel der geschlossenen Augen schwindet deutlich von der Peripherie des Gesichtsfeldes nach dem Zentrum hin, und der letzte Rest desselben bleibt als der Maxwellsche Fleck bestehen. Bei gewissen Helligkeitsgraden, namentlich dem oben bezeichneten des Himmels, wenn die ersten Sterne sichtbar werden, ist die Erscheinung beim Aufschlagen der Augen noch komplizierter. Während nämlich in der beschriebenen Weise das Dunkel von der Peripherie nach dem Zentrum schwindet, sieht man auch noch entweder die Netzhautgrube allein, oder den ganzen Maxwellschen Fleck hell aufblitzen. Vielleicht geht das helle Aufblitzen der dunklen Erscheinung etwas voraus, aber die Zeit ist so kurz, daß beides scheinbar gleichzeitig eintritt, wie auch Aubert an Nachbildern bei der Beleuchtung durch den elektrischen Funken ähnliches bemerkt hat.

Zuweilen, wenn die Netzhautgrube recht deutlich erscheint, sehe ich in dem gefäßlosen Hofe noch schwache Linienzeichnungen, ähnlich den Umrissen einer vielblättrigen Blume (z. B. einer Georgine, Dahlia). Es sind dies wohl Andeutungen derselben Zeichnung, welche deutlicher bei intermittierendem Lichte zum Vorschein kommt.

Endlich muß ich noch bemerken, daß ich den Maxwellschen Fleck oft zufällig des Morgens nach dem Aufstehen, wenn ich das Auge zuerst auf ein helles Fenster mit breiter lichter Fläche geheftet hatte, und es dann nach einem dunklen Orte wendete, hell auf dunklem Grunde gesehen habe. Absichtlich die Erscheinung hervorzurufen ist mir bis jetzt nicht gelungen. Es erscheint hierbei ein blendend heller Kreis von der Größe des gefäßlosen Hofes, nach den Rändern hin abschattiert, und mit Andeutungen der strahligen Zeichnung. Diese letztere Erscheinung läßt schließen, daß, wenn das Auge recht erholt und reizbar ist, der Lichteindruck im gelben Fleck länger anhält als in den übrigen Teilen der Netzhaut, während andererseits der Lichteindruck an derselben Stelle auch später zu beginnen scheint, wie die beschriebenen Erscheinungen beim Öffnen des Auges zeigen. Daß der stark gefärbte Teil des gelben Flecks auf einem blauen Felde dunkel erscheint, scheint der Absorption des blauen Lichts durch das gelbe Pigment zugeschrieben werden zu dürfen. Gelb gefärbt sind hier gerade die Teile, welche vor den eigentlich lichtempfindlichen Teilen, den Zapfen, liegen. Daß der Fleck übrigens subjektiv nur schwach gezeichnet und schnell vorübergehend erscheint, erklärt sich in derselben Weise, wie das flüchtige Erscheinen der Gefäßfigur. Das zuweilen vorkommende helle Aufblitzen des gelben Flecks dagegen beim Öffnen des Auges läßt sich noch nicht erklären.*

Wie bisher beschrieben, verhalten sich die Erscheinungen im nicht polarisierten Lichte. Wenn man dagegen das Auge auf ein Feld richtet, von wo polarisiertes Licht kommt, so erscheinen Haidingers Polarisationsbüschel

* Die Entstehungsbedingung des Maxwellschen Fleckes, sowie überhaupt die entoptischen Wahrnehmungen im Gebiet der Macula sind neuerdings von Gullstrand (Gräfes Arch. f. Ophthalmol. 62, 1905, S. 1; 66, 1907, S. 141) und Dimmer (ebenda 65, 1907, S. 486) sehr eingehend untersucht und beschrieben worden. Genaueres Eingehen auf diese Untersuchungen würde hier zu weit führen. Erwähnt sei nur, daß Gullstrand die Gelbfärbung der Macula für eine postmortale Erscheinung hält. N.

im Fixationspunkte. Man sieht diese z. B., wenn man durch ein Nicolsches Prisma nach einem gut beleuchteten weißen Papierblatte oder nach einer hellen Wolkenfläche blickt. Die Büschel sind in Fig. 1 auf Tafel III abgebildet, wie sie liegen, wenn die Polarisationsebene des Lichtes vertikal ist. Die helleren durch zwei zusammengehörige Hyperbeln begrenzten Flecke erscheinen auf weißem Felde bläulich, der dunkle Büschel, der sie trennt, und im Zentrum am schmalsten, nach seinen Enden hin breiter ist, ist dagegen gelblich gefärbt. Wenn man das Nicolsche Prisma dreht, dreht sich die Polarisationsfigur um den gleichen Winkel. Nach einer Bemerkung von Brewster, die ich für mein Auge bestätigen kann, ist der dunkle Büschel in seiner Mitte viel schmaler, wenn er horizontal (d. h. der Verbindungslinie beider Augen parallel) gerichtet ist, als wenn er senkrecht steht, wie in der Abbildung. Die Fläche, welche von der Polarisationsfigur bedeckt wird, erscheint Maxwells und meinem Auge an Größe dem gefäßlosen Hofe des gelben Flecks gleich. Der Rand der Netzhautgrube geht ungefähr durch die hellsten Stellen der blauen Flächen hindurch. Brewster gibt den Durchmesser der Polarisationsbüschel etwas größer an, nämlich 4°, und Silbermann 5°, was vielleicht damit zusammen hängt, daß sie in verschiedenen Augen sehr verschiedene Deutlichkeit zu haben scheinen, und deshalb die schwächsten Teile der Figur am äußersten Rande von einigen wahrgenommen werden, von anderen nicht. Ich selbst habe vor 12 Jahren unmittelbar nach Haidingers Entdeckung mit der größten Mühe nichts von den Büscheln wahrnehmen können, und in der letzten Zeit, als ich es wieder versuchte, sah ich sie beim ersten Blick durch ein Nicolsches Prisma. Auch ist in meinem linken Auge die Mitte des dunklen Büschels viel dunkler, als im rechten. Daran ist vielleicht die veränderliche Färbung des gelben Flecks schuld. Wenn man sie übrigens sieht, so schwinden sie doch immer bald wieder, wie jede subjektive Erscheinung, die an eine Struktur der Netzhaut gebunden ist. Sie treten dann neu hervor, wenn man den Polarisator um 90° dreht.

Individuen, welche die Büschel recht deutlich wahrnehmen, sehen sie auch in solchem Lichte, welches nur teilweise polarisiert ist, auf glänzenden Flächen, am Himmel usw., und sind dadurch imstande, überall gleich die Richtung der Polarisationsebene zu erkennen. Von den verschiedenen Farben homogenen Lichts zeigt aber, wie Stokes gefunden hat, nur das Blau die Polarisationsbüschel. In den weniger brechbaren Teilen des Spektrums kommen sie nicht zur Erscheinung. In einem blauen Felde erscheinen die bläulichen Hyperbelflächen hell, der gelbe Büschel dazwischen dagegen dunkel, so z. B. wenn man durch ein stark gefärbtes blaues Glas und den Polarisator nach einer weißen Fläche blickt. Ich selbst sehe die Büschel nicht bloß nicht in homogenem Grün, Gelb, Rot, sondern auch nicht einmal in den gemischten, aber ziemlich gesättigten Abstufungen dieser Farbentöne, welche gefärbte Gläser geben. Es folgt daraus, daß auch im weißen Licht die Erscheinung von den Veränderungen des Blau herrührt. Am Orte der gelben Büschel fehlt das Blau, und diese erscheinen eben deshalb gelb und dunkler.

Wenn Licht durch Refraktion, Reflexion oder Doppelbrechung polarisiert wird, werden stets sämtliche Farben nahehin gleichmäßig von der Polarisation betroffen. Nur bei der Absorption farbigen Lichts in doppeltbrechenden Körpern kann es vorkommen, daß das Licht gewisser Farben polarisiert wird, das Licht anderer Farben dagegen nicht. Das bekannteste Beispiel solcher Absorption ist der Turmalin, welcher so häufig als Mittel, Licht zu polarisieren, gebraucht

wird. Es ist diese Eigenschaft übrigens unter den doppeltbrechenden gefärbten Körpern sehr verbreitet, man kann sie durch Färbung derselben künstlich erzeugen, und sie beruht darauf, daß bald wie im Turmalin der ordentliche, bald wie im Rutil und Zinnstein der außerordentliche Strahl stärker absorbiert wird. Nun sind aber die meisten organischen Fasern und Membranen schwach doppeltbrechend und zwar verhalten sich beide meist wie einachsige Kristalle, deren Achse in den Fasern parallel ihrer Länge, in den Membranen senkrecht zu ihrer Fläche steht. Die Erscheinung der Polarisationsbüschel ist nun zu erklären, wenn man annimmt, daß die gelbgefärbten Elemente des gelben Flecks schwach doppeltbrechend sind, und daß der außerordentliche Strahl von blauer Farbe in ihnen stärker absorbiert werde, als der ordentliche Strahl.

Geht blaues Licht von beliebiger Polarisation durch eine Fasermasse von dieser Eigenschaft in Richtung der Fasern, so wird es stark absorbiert; geht es dagegen senkrecht gegen die Richtung der Fasern hindurch, so wird es stark absorbiert werden, wenn es parallel den Fasern polarisiert ist, schwach dagegen, wenn seine Polarisationsrichtung ebenfalls senkrecht zur Richtung der Fasern ist. Nun verlaufen im gelben Fleck die sogenannten radiären Fasern von H. Müller, welche an anderen Stellen der Netzhaut senkrecht gegen deren Fläche stehen, schräg, indem ihr hinteres Ende sich der Netzhautgrube nähert[1]. In der Zentralgrube fehlen die Körnerschichten und die Zwischenkörnerschicht entweder ganz, oder sind wenigstens sehr dünn, dagegen ist die innere Körnerschicht und die Zwischenkörnerschicht in der Umgebung der Netzhautgrube dicker als an anderen Stellen; ähnlich verhält sich die Schicht der Ganglienzellen, obgleich diese auch in der Zentralgrube doch noch drei Reihen Zellen hintereinander enthält, so daß es scheint, als ob die zu den Zapfen der Zentralgrube gehörigen anderen Elemente in der Umgebung dieser Grube angehäuft seien, und deshalb die Verbindungsfasern sowohl nervöser als bindegewebiger Natur schräg verlaufen müssen. An dem Rande der Netzhautgrube nun, wo die Fasern überwiegend eine schräg gegen ihr Zentrum verlaufende Richtung haben, würde nach der gemachten Annahme das Licht stärker dort absorbiert werden, wo die Fasern der Polarisationsebene parallel laufen. Ist letztere vertikal, so werden also über und unter der Netzhautgrube sich dunklere Stellen bilden, rechts und links hellere. Ebenso würden die Stellen dunkler werden müssen, wo die Fasern nicht mehr schräg gegen die Fläche der Netzhaut liegen, also im Zentrum der Grube selbst, und nach dem äußeren Rande des gelben Flecks hin. In der Tat entspricht die Erscheinung der Polarisationsbüschel diesen Folgerungen.

Man hat noch andere Ansichten über die Entstehung der Polarisationsbüschel aufgestellt. Unter diesen ist namentlich die von Erlach angedeutete, von Jamin spezieller ausgeführte, ziemlich günstig aufgenommen. Beide meinten die Büschel herleiten zu können von den vielfachen Refraktionen, die das Licht an den brechenden Flächen des Auges erleidet. In der Tat würde senkrecht polarisiertes Licht, welches von oben oder unten her in das Auge dringt, stärker reflektiert und weniger eingelassen werden, als solches, welches von rechts oder links her kommt, und demnach müßte der obere und untere Quadrant des Gesichtsfeldes etwas dunkler erscheinen, als der rechte und linke. Aber wenn

[1] Bergmann in Henle und Pfeuffer Zeitschr. für rat. Med. (2) V. 245, (3) II. 83. — Max Schultze, Observationes de Retinae structura penitiori. Bonn 1859. p. 15.

Polarisation durch Refraktion der Grund wäre, müßten erstens die Büschel in allen homogenen Farben nahehin gleich deutlich erscheinen, während sie nur im Blau deutlich erscheinen. Zweitens müßten sie nach den Rändern des Gesichtsfeldes hin kontinuierlich an Stärke zunehmen. Im Gegenteil sind sie auf einen sehr kleinen zentralen Teil beschränkt. Drittens müßte ihr Zentrum im Achsenpunkte des Auges liegen, nicht im Fixationspunkte, der von jenem, wie es scheint, in allen Augen verschieden ist. Es haben auch schon Stokes, Brewster und Maxwell auf das ungenügende dieser Erklärung aufmerksam gemacht, und die beiden letzteren haben bemerkt, daß die Ausdehnung der Büschel mit der des gelben Flecks übereinkomme. Allerlei andere, aber nicht klar durchgeführte Erklärungen sind auch von Haidinger und Silbermann gegeben

Haidinger beschreibt im blauen Felde, wo man die Loeweschen Ringe sieht, auch noch helle Andreaskreuzlinien, über die noch keine Beobachtungen von anderen Augen vorliegen. Ich selbst kann sie nicht sehen.

1844. W. Haidinger, Über das direkte Erkennen des polarisierten Lichts. Poggendorffs Ann. LXIII. 29.

1846. Derselbe, Über komplementäre Farbeneindrücke bei Beobachtung der Lichtpolarisationsbüschel. Poggendorffs Ann. LXVII. 435.
Derselbe, Beobachtung der Lichtpolarisationsbüschel in geradlinig polarisiertem Lichte. Poggendorffs Ann. LXVIII. 73.
Derselbe, Beobachtung der Lichtpolarisationsbüschel auf Flächen, welche das Licht in zwei senkrecht aufeinander stehenden Richtungen polarisieren. Poggendorffs Ann. LXVIII. 305.
Silbermann, *Essai d'explication des houppes ou aigrettes visibles à l'oeil nu dans la lumière polarisée* *C. R.* XXIII. 624. *Inst.* Nr. 665. p. 327.

1847. v. Erlach, Mikroskopische Beobachtungen über organische Elementarteile bei polarisiertem Licht, in Müllers Archiv für Anat. und Physiol. 1847. p. 313.
Haidinger, Helle Andreaskreuzlinien in der Sehachse. Ber. d. Freunde der Naturwiss. in Wien II. 178. Poggendorffs Ann. LXX. 403.
Botzenhart, Polarisationsbüschel am Quarz. Ber d. Fr. d. N. W. in Wien I. 82.
Derselbe, *Sur une modification des houppes colorées de* Haidinger. *C. R.* XXIV. 44. *Inst.* No. 680. p. 11. Poggendorffs Ann. LXX. 399.

1848. Jamin, *Sur les houppes colorées de* Haidinger. *C. R.* XXVI. 197. Poggendorffs Ann. LXXIV. 145. *Inst.* No. 737. p. 53.

1850. D. Brewster, *On the polarizing structure of the eye.* *Sillim. J.* (2) X. 394. *Rep. of British Assoc.* 1850. II. 5. Wiener Ber. V. 442.
G. G. Stokes *on* Haidingers *brushes.* *Sillim. J.* (2) X. 394. *Rep. of British Assoc.* 1850. II. 20.
W. Haidinger, Das Interferenzschachbrettmuster und die Farbe der Polarisationsbüschel. Wien. Ber. VII. 389. Poggendorffs Ann. LXXXV. 350. *Cosmos.* I. 252, 454.

1852. Derselbe, Die Loeweschen Ringe eine Beugungserscheinung. Wien. Ber. IX. 240—249. Poggendorffs Ann. LXXXVIII. 451—461.

1854. W. Haidinger, Dauer des Eindrucks der Polarisationsbüschel auf der Netzhaut. Wien. Ber. XII. 678—680. Poggendorffs Ann. XCIII. 318—320.
Derselbe, Beitrag zur Erklärung der Farben der Polarisationsbüschel durch Beugung. Wien. Ber. XII. 3—9. Poggendorffs Ann. XCI. 591—601.
Derselbe, Einige neuere Ansichten über die Natur der Polarisationsbüschel. Wien. Ber. XII. 758—765. Poggendorffs Ann. XCVI. 314—322.
Stokes, Über das optische Schachbrettmuster. Wien. Ber. XII. 670—677. Poggendorffs Ann. XLVI. 305—313.

1856. J. C. Maxwell, *On the unequal sensibility of the foramen centrale to light of different colours.* *Athen.* 1856. p. 1093. *Edinb. Journ.* (2) IV. 337. *Inst.* 1856. p. 444. *Rep. of Brit. Assoc.* 1856. II. 12.

1858. Power in *Phil. Mag.* (4) XVI. 69.

1859. Brewster in *C. R.* XLVIII. 614.

2. Helle bewegliche Punkte erscheinen im Gesichtsfelde, wenn man namentlich während angestrengten Gehens oder anderer Leibesbewegung, eine große gleichmäßig erleuchtete Fläche, z. B. den Himmel oder Schneefelder starr ansieht. Die Pünktchen springen an verschiedenen Orten des Gesichtsfeldes auf, und laufen in sehr verschiedenen meist nicht ganz geraden Bahnen ziemlich schnell fort. Dabei erscheinen auf dem Wege, den eines eingeschlagen hat, nach kurzen Zwischenzeiten neue, die auf demselben Wege fortlaufen. Purkinje bemerkt, daß, wenn man nach einer begrenzten lichten Fläche, z. B. gegen ein Fenster schaut, jeder Punkt auf der von der Mitte des Sehfeldes abgekehrten Seite ein kleines Schattenbild nach sich zieht. Da sie feste Wege einzuhalten scheinen, sind sie von manchen Beobachtern (J. Müller) für eine Erscheinung des Blutlaufs gehalten worden. Sie sind aber, wenigstens in meinem Auge, viel zu vereinzelt, als daß man sie für Blutkörperchen halten könnte, ihre Bahnen ebenfalls viel zu weit voneinander entfernt, und ihre Bewegung zu schnell, als daß ihre Wege einem Kapillarnetz entsprechen könnten. Wenn ihre Erscheinung wirklich mit dem Blutlauf zusammenhängt, könnte man höchstens daran denken, daß einzelne vielleicht fettreiche Lymphkörperchen, die durch größere Gefäßstämmchen hinfließen, sich in dieser Art zeigen. Diese Erscheinung scheint übrigens von den meisten Menschen leicht gesehen zu werden.*

Die Blutkörperchen sind übrigens eben noch groß genug, um wenn sie sich in der Netzhaut befinden, und auf diese einen Eindruck machen, noch erkannt zu werden. Ihr Durchmesser beträgt im Mittel 0,0072 mm und die Größe der kleinsten erkennbaren Distanzen ist 0,005 mm (s. S. 30). Verschiedene Beobachter haben denn auch Reihen von fortlaufenden Kügelchen und unbestimmtere wallende und fließende Bewegungen bei verschiedenen Veranlassungen gesehen. Die eigentümliche Erscheinung ineinander verschlungener Strömungen, welche bei intermittierendem Lichte eintritt, und von Vierordt

* Daß diese Erscheinung mit dem Blutkreislauf zusammenhängt, erkennt man leicht daran, daß die Bewegung der leuchtenden Körperchen bei manchen Menschen stets pulsatorische Beschleunigung zeigt, bei allen aber es leicht gelingt, durch leisen Druck auf die Schläfenseite des Augapfels die Bewegung zu verlangsamen und in eine ganz deutlich pulsatorische überzuführen. Im Rhythmus des Pulses schieben sich die Pünktchen vorwärts; bei stärkerem Druck bewegen sie sich nur noch bei jedem Pulsschlag ein wenig, und bleiben zwischendurch fast still stehen. Bei noch weiterer Drucksteigerung steht die Bewegung still und im selben Augenblick verschwimmen die Bilder der gesehenen Gegenstände.

Schon Rood, Silliman Journ. (2) **30**, 264 u. 385 hatte darauf hingewiesen, daß die Bewegung der Pünktchen beim Sehen durch ein blaues Glas besonders deutlich zu sehen ist. Untersucht man die Erscheinung bei verschiedenfarbiger monochromatischer Erleuchtung des Gesichtsfeldes, so ergibt sich, daß bei rotem, gelbem, grünem, aber auch bei cyanblauem Licht keine Spur von den Körperchen zu sehen ist, daß sie dagegen im Indigo und Violett sehr deutlich sichtbar sind, und bemerkenswerterweise auch im Gelbgrün zwischen 570 und 560 mm gesehen werden können. Das sind also gerade die Lichtarten, die vom Hämoglobin am stärksten absorbiert werden und es kann hiernach wohl keinem Zweifel unterliegen, daß es sich um Bilder der roten Blutkörperchen handelt. Die verhältnismäßig spärliche Zahl der gleichzeitig sichtbaren Körperchen dürfte darauf beruhen, daß erstens nur die Körperchen in einer ganz bestimmten Ebene der Netzhaut (sehr nahe der Membr. limitans int.) günstige Bedingungen für Sichtbarkeit ergeben und zweitens auch diese wohl nur bei einer bestimmten Orientierung, bei der sie das Licht besonders stark absorbieren. Da die bewegten Pünktchen hell erscheinen, wäre auch daran zu denken, daß es sich um Lücken in der Reihe der Blutkörperchen, die eine Kapillare erfüllen, handelt.

Meist sieht man, daß der foveale Bezirk stets frei von der Strömung bleibt. Vgl. hierzu G. Abelsdorff und W. Nagel, Über die Wahrnehmung der Blutzirkulation in den Netzhautkapillaren. Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. der Sinnesorgane **34**, 291. 1904. N.

auf den Blutlauf der Aderhaut bezogen wird, ist schon oben erwähnt. Ähnliches sieht man übrigens auch zuweilen ohne intermittierendes Licht, wenn man in eine helle Fläche hineinstarrt, besonders nachdem man durch Bücken das Blut nach dem Kopf getrieben hat. Sobald durch den Lichteindruck die Netzhaut so weit ermüdet ist, daß die Fläche dunkel wird, erscheint gleichsam hinter der hellen Fläche, welche verschwindet, eine gefleckte rötliche Fläche, deren Flecken bald bewegt, bald ruhig sind. Reihen von fließenden Kügelchen haben Steinbuch und Purkinje[1], namentlich bei schwachem Drucke auf das Auge gesehen. Letzterer sah sie zuerst bei Beobachtung der dunklen Akkommodationsfigur, welche bei ihm aus einem zentralen weißen Kreise, umgeben von einem bräunlichen unbestimmt begrenzten Hofe bestand. Rechts und links neben dem weißen Kreise sah er zwei senkrechte lichte Linien, in denen sich Reihen von Kügelchen bewegten, rechts abwärts, links aufwärts. Ich habe bis jetzt nichts Ähnliches sehen können. Johannes Müller[2] sah bei Kongestionen nach dem Kopfe, oder wenn er sich gebückt hatte und sich plötzlich aufrichtete, ein Springen und Fahren, wie von dunklen geschwänzten Körpern in den mannigfaltigsten Richtungen, und vergleicht diese Erscheinung mit dem Ameisenlaufen in den Gefühlsnerven.

Ein Flimmern wie von kleinen bewegten Körpern sehe ich auch zuweilen von einer mit grobem Kalk beworfenen und sehr schief durch ein kleines Fenster beleuchteten Wand, die daher mit einer Menge kleiner schwarzer unregelmäßiger Punkte übersät erscheint. Aber hier könnten es vielleicht Nachbilder der Pünktchen sein, welche durch unvermeidliche kleine Schwankungen des Auges aufblitzen.

Purkinje beschreibt noch andere Erscheinungen, die bei Aufregung des Gefäßsystems oder Anstrengung der Augen eintraten. Seine Beschreibung lautet[3]: „Wenn ich bei hellem Tage eine viertel bis halbe Stunde im Freien stark gegangen bin, und ich trete plötzlich in einen finsteren oder wenigstens stark verdunkelten Raum, so wallt und flackert im Gesichtsfelde ein mattes Licht, gleich der auf einer horizontalen Fläche verlöschenden Flamme von ausgegossenem Weingeiste, oder gleich einer im Finstern schwach flimmernden mit Phosphor bestrichenen Stelle. Bei schärferer Betrachtung bemerke ich, daß der flackernde Nebel aus unzählbaren, äußerst kleinen unregelmäßig lichten Pünktchen besteht, die sich in verschiedenen Linien untereinander bewegen, sich bald da bald dort anhäufen, unbestimmt begrenzte Flecke bilden, die sich wieder zerteilen um sich anderwärts zu versammeln. Jeder Punkt läßt eine lichte Spur seiner Bewegung hinter sich, welche Spuren sich mannigfaltig durchschneidend Netze und Sternchen bilden; so wimmelt es eine große Strecke im Innern des Gesichtsfeldes und hindert das deutliche Sehen. Am ähnlichsten dieser Erscheinung ist das Gewimmel der sogenannten Sonnenstäubchen.“

Er sieht dasselbe bei bedecktem rechten Auge, wenn er mit dem schwach- und fernsichtigen linken eine helle Fläche fixiert, ferner bei allmählich verstärktem Druck auf das linke Auge. Die Pünktchen erscheinen lebhafter bei offenem als bei geschlossenem Auge, besonders wenn dasselbe nach einer nicht gänzlich verdunkelten entfernten Stelle hinsieht. Das äußere Licht ist also der Erscheinung förderlich.*

[1] Beobachtungen und Versuche I. 127.
[2] Physiologie II. 390.
[3] Beobachtungen und Versuche I. 63.

* Vergl. auch oben, diesen Band, S. 9, Anmerkung. N.

Pulsierende Kugeln, zwei an der rechten Seite des Gesichtsfeldes, eine Reihe an der unteren, drei an der linken Seite, erscheinen ihm auf der hellen Himmelsfläche, wenn er gelaufen ist, bei Druck auf das Auge oder bei angestrengtem Husten. Auch pulsiert der Fixationspunkt, und es erscheinen noch graue Streifen, teils kreisförmig den Fixationspunkt umgebend, teils radiale Gefäßstreifen[1].

3. Figuren, die bei gleichmäßig erleuchteter Netzhaut sichtbar werden. Purkinje[2] bemerkt, daß wenn er nach einer großen etwas blendenden Fläche starr hinsieht (z. B. auf den gleichmäßig mit Wolken überzogenen Himmel oder nahe in eine Kerzenflamme), in einigen Sekunden wiederholt in der Mitte des Gesichtsfeldes lichte Punkte aufspringen, die ohne ihre Stelle geändert zu haben, schnell wieder verschwinden, und schwarze Punkte zurücklassen, die ebenso schnell wieder vergehen. Wendete er, während die Lichtpunkte hervorspringen, das Auge gegen eine stark verdunkelte Stelle, oder schloß er es, so setzte sich die Erscheinung auf gleiche Weise fort, nur in einem gemilderten Lichte, als würden durch das erste Hinsehen die Punkte nur entzündet und glimmten dann für sich allein ab. Ich selbst habe ebenfalls häufig solche vereinzelte lichte Punkte, die nicht Nachbilder sein konnten, weil entsprechende kleine helle Gegenstände im Gesichtsfelde fehlten, und die dunklen Nachbilder zurückließen, zufällig gesehen, aber meist nur einen auf einmal, und im ganzen selten sich wiederholend.

Hierher gehört ferner Purkinjes Kreuzspinnengewebefigur[3] aus lichten rötlichen Linien auf rotem Grunde gebildet, die das Gewebe einer Kreuzspinne bald einfacher, bald komplizierter nachbildete. Um die Figur gut zu sehen, hatte sich Purkinje so gelagert, daß die Strahlen der aufgehenden Sonne seine Augenlider treffen mußten. Beim Erwachen sah er hinter den geschlossenen Lidern die Figur.

Überhaupt ist das Werk von Purkinje außerordentlich reich an subjektiven Beobachtungen ähnlicher Art, und wird noch lange eine Hauptfundgrube für ähnliche Beobachtungen bleiben. Aber viele von den Erscheinungen, die er beschreibt, sind von anderen Augen noch nicht wieder aufgefunden worden, und für diese bleibt es also vorläufig fraglich, ob sie nicht auf individuellen Eigentümlichkeiten seiner Organe beruhten[4].

*Zusatz von W. Nagel.*

Erwähnung verdient noch die Erscheinung des besonders im dunkeln Gesichtsfelde aus unbekannten Ursachen auftretenden Flimmerns oder Flackerns. Am bekanntesten ist das unter pathologischen Umständen zu beobachtende $^1/_4$ bis $^1/_2$ Stunde anhaltende Flimmern, das von migräneartigen Kopfschmerzen begleitet oder gefolgt wird. Das Flimmern, ein Wechsel zwischen Hell- und Dunkelempfindung, breitet sich während des Anfalles auf immer größere Partien des Gesichtsfeldes aus, die gleichzeitig die Empfindlichkeit gegen äußere Lichtreize ganz oder teilweise verlieren (sogen. Flimmerskotom). Qualitativ mit diesem Flimmerphänomen nahe verwandt ist ein physiologisches, das bei ganz normalem Befinden auftreten kann und bei manchem Beobachter, so bei mir, recht häufig

[1] Beobachtungen und Versuche I. 134.
[2] Ebenda. I. 67.
[3] Ebenda. II. 87.
[4] Siehe noch die Erscheinungen in Nr. XXII des ersten, in Nr. IV, V, XV des zweiten Bandes seiner Beobachtungen und Versuche.

auftritt, ohne daß besondere Bedingungen für sein Entstehen anzugeben wären. Ich sehe es nur im Dunkeln, am häufigsten bei oder nach leichtem Druck auf ein Auge, aber auch ohne solchen Druck. Das Tempo des Intermittierens scheint mir sehr konstant, ich taxiere es, ebenso wie beim pathologischen Flimmerskotom auf 10 bis 15 Oszillationen in der Sekunde. Während aber das pathologische Flimmerphänomen meistens längere Zeit gleichmäßig fortbesteht, tritt das physiologische bei mir stets periodisch auf, so daß es 1 bis 2 Sekunden lang wahrnehmbar ist, während dieser Zeit an Intensität an- und wieder abschwellend; dann folgt eine 3 bis 5 mal so lange Pause ohne Flimmern, wonach sich der Prozeß wiederholt.

Über die Ursache dieser Erscheinung, wie auch des Flimmerns bei Migräne, lassen sich begründete Vermutungen zurzeit kaum äußern. N.

# Zusatz von W. Nagel.

## Adaptation, Dämmerungssehen und Duplizitätstheorie.

### A. Die Adaptation des Auges für verschiedene Lichtintensitäten.

#### 1. Die Dunkeladaptation.

Unter der Adaptation des Auges[1] verstehen wir eine Einstellung des Empfindlichkeitsgrades der Netzhaut für verschiedene Intensitäten der Beleuchtung. Durch die Adaptationsfähigkeit wird das Auge in den Stand gesetzt, bei sehr geringen Beleuchtungsstärken noch zu sehen und andererseits doch die Helligkeit eines sonnenhellen Sommertages ertragen zu können, ohne daß die Helligkeit als blendend empfunden wird und das Auge schädigt. Wenn nur wenig oder gar kein Licht auf die Netzhaut fällt, wird ihre Empfindlichkeit durch den Adaptationsprozeß dem Lichtreiz gegenüber außerordentlich viel höher, als wir sie bei einem Auge finden, das längere Zeit eine helle Fläche, etwa den Himmel bei Tage, angeblickt hat. Man nennt diese Änderung, die sich im Auge bei partiellem oder völligem Lichtabschluß einstellt, die Dunkeladaptation des Auges, den umgekehrten Vorgang, die Anpassung an hohe Lichtintensitäten, Helladaptation. Man spricht indessen auch von einem Zustand der Dunkeladaptation bzw. Helladaptation, und meint damit die Zustände des Auges, in denen es sich nach länger dauerndem Lichtabschluß, bzw. nach längerer Einwirkung starken Lichtes befindet. Die Änderung des Zustandes ist nämlich, wie es von vornherein anzunehmen und durch den Versuch erwiesen ist, eine begrenzte, sie führt nach bestimmter Zeit zu einem ziemlich stationären Zustand. Bei völligem Abschluß objektiven Lichts vom Auge steigt dessen Empfindlichkeit einige Stunden lang an, während der umgekehrte Vorgang der Helladaptation bei Einwirkung starken Lichts auf die Netzhaut schon in wenigen Minuten sein Ende erreicht. Das Genauere über diese Änderungen und die Grenzen der Adaptationsfähigkeit werden wir weiter unten kennen lernen.

Es ist nicht zu verkennen, daß es eine etwas einseitige Betrachtung wäre, wollte man den Adaptationszustand eines Auges nur nach dem jeweiligen Stande der Reizschwelle, also dem schwächsten noch eben wirksamen Reize, beurteilen; es ist

[1] Wegen der Literatur bis 1902, soweit sie hier nicht zitiert ist, vergl. A. Tschermak, Referat: Die Hell-Dunkeladaptation des Auges usw.; Ergebnisse der Physiologie I, 2. S. 695. 1902.

nicht von vornherein sicher, ob die Empfindlichkeit gegen merklich „überschwellige" Lichter stets der „Schwellenempfindlichkeit" parallel gehen muß, ob man also z. B. behaupten darf, für ein Auge *A*, dessen Reizschwelle um das Hundertfache tiefer liegt, als die eines Auges *B*, müsse eine bestimmte überschwellige Lichtintensität auf den hundertsten Teil ihres Betrages geschwächt werden, damit *A* und *B* subjektiv gleiche Helligkeit empfinden. Derartige Vergleiche sind natürlich nur zwischen den beiden Augen eines und desselben Beobachters möglich und schon aus diesem Grunde nicht sehr präzise ausführbar. Außerdem wird aber in dem Augenblick, wo ein merklich überschwelliger Reiz die Netzhaut trifft, deren Adaptationszustand außerordentlich schnell verändert, so daß solche Vergleichungen zwischen der Empfindlichkeit zweier Augen stets nur in einem Augenblick geschehen können. Unter solchen Umständen wird man es als eine hinreichende Genauigkeit der Übereinstimmung bezeichnen dürfen, wenn sich die Empfindlichkeit, an Schwellenwerten gemessen, und die an überschwelligen Werten binokular bestimmte Erregbarkeit als in der gleichen Größenordnung liegend herausstellen. Dieses ist nun nach meinen Beobachtungen durchaus der Fall, und ich habe den Eindruck gewonnen, daß die Empfindlichkeit bei beiden Untersuchungsweisen um so mehr übereinstimmend gefunden wird, je sorgfältiger die genannten Fehlerquellen vermieden werden, und daß demnach auch die Bemessung des Adaptationszustandes nach den Schwellenwerten zutreffend ist.

Die ersten systematischen Untersuchungen über die Dunkeladaptation verdanken wir H. Aubert[1], der auch den Namen Adaptation einführte. Aubert bemühte sich, die Reizschwelle des Sehorgans nach mehr oder weniger langem Dunkelaufenthalt zu bestimmen. Nach dem Eintritt in das verdunkelte Untersuchungszimmer sank diese Schwelle; die reziproken Werte der Schwellenwerte gaben ein Maß für den jeweiligen Empfindlichkeitsgrad des Auges und konnten nun in Kurvenform so dargestellt werden, daß in einem Koordinatensystem als Abszissen die Zahl der im Dunkeln verbrachten Minuten, als Ordinaten die Empfindlichkeitswerte aufgetragen wurden. Solche Kurven, die den Gang der Dunkeladaptation veranschaulichen, sind seit Aubert vielfach konstruiert worden. Das Verfahren, dessen sich Aubert bei seinen Messungen bediente, bestand darin, daß ein Platindraht durch ein konstantes galvanisches Element zu schwacher Glut gebracht wurde, bei der im Dunkelzimmer der Draht noch eben sichtbar war. Die Länge des durchströmten Platindrahts war veränderlich, und je größer sie war, desto schwächer glühte und leuchtete der Draht. Aubert fand in den ersten Minuten nach dem Eintritt in das Dunkelzimmer ein schnelles Ansteigen der Lichtempfindlichkeit, bei längerem Aufenthalt im dunkeln Raume stieg die Empfindlichkeit dann immer langsamer. Nach zweistündigem Verweilen im Dunkelzimmer war nach Auberts Berechnung die Lichtempfindlichkeit auf das 35fache ihres Anfangswertes gestiegen.

Neuere Untersuchungen haben viel höhere Werte für den Anstieg der Empfindlichkeit gegeben. Es kommt bei diesen Messungen relativer Empfindlichkeitswerte natürlich sehr auf die Bedingungen an, unter denen beobachtet wird, vor allem auf den Ausgangspunkt der Beobachtungsreihe, d. h. auf den Adaptationszustand, der im Auge des Beobachters beim Betreten des Dunkelzimmers herrschte. Aubert dürfte seine Versuche mit einem mittleren, nachträglich nicht zu bestimmenden Adaptationszustand begonnen haben; sein Ver-

[1] Physiologie der Netzhaut. Breslau 1865. Von älteren Arbeiten über Adaptation sind noch wichtig: Charpentier, Expériences sur la marche de l'adaptation rétinienne. Archives d'ophtalm. 6. 1887. Treitel, Über das Verhalten der normalen Adaptation. v. Graefes Arch. f. Ophthalm. 1887.

fahren der Empfindlichkeitsmessung konnte aber auch aus anderen Gründen, die aus dem weiter unten Mitgeteilten klar werden, keine Werte von allgemeiner Bedeutung geben.

Die Augenärzte pflegen die Adaptationsfähigkeit der Augen mittels eines von Foerster[1] angegebenen Instruments zu bestimmen, das unter den Namen Photometer oder auch Photoptometer bekannt ist. Es besteht aus einem innen geschwärzten Holzkasten, der auf der einen Seite zwei Löcher hat, vor die der zu Untersuchende seine Augen bringt; an der gegenüberliegenden Innenwand wird ein weißes Blatt mit breiten schwarzen Streifen oder sonstigen Figuren angebracht, das als Beobachtungsobjekt dient. Es erhält seine Beleuchtung durch ein 5 cm² großes Fensterchen in derselben Wand, in der auch die Augenlöcher angebracht sind. Das Fenster ist mit durchscheinendem weißem Papier oder Milchglas verschlossen. Außerhalb desselben befindet sich eine kleine Laterne, die eine Kerze enthält und ihr Licht auf das Fensterchen strahlen läßt. Zur Regulierung der Lichtmenge, die von dem Fenster auf das Beobachtungsobjekt fällt, dient eine quadratische Blende, wie sie durch Fig. 57 veranschaulicht wird. Eine Skala gestattet, die jeweils eingestellte Blendenweite in Quadratmillimetern abzulesen.

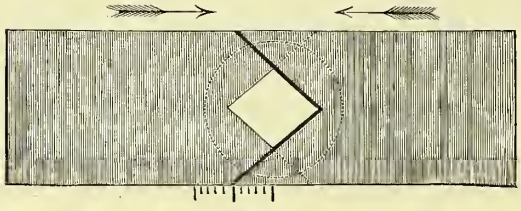


Fig. 57.

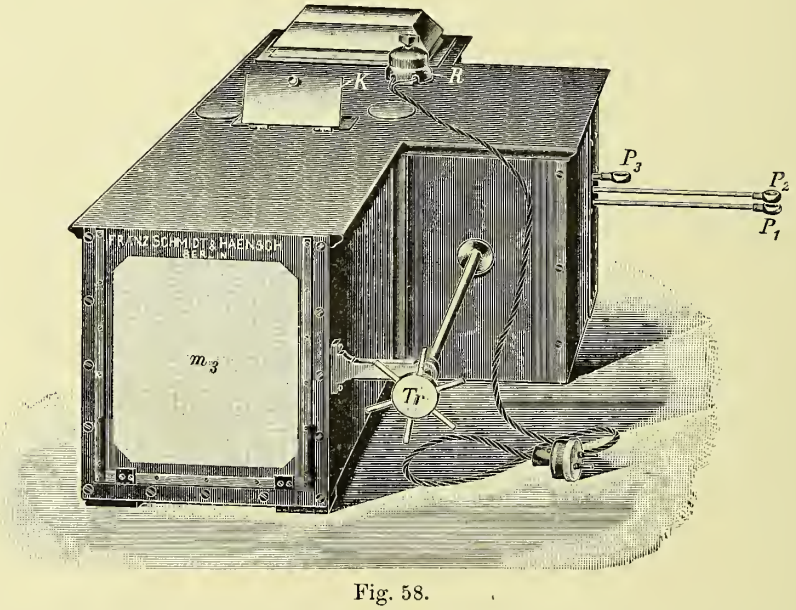



Fig. 58.

Ein normales Auge kann bei 2 mm² Blendenweite noch eben die hellen von den dunkeln Partien des Beobachtungsobjekts an der Kastenwand unterscheiden, wenn es zuvor 15 bis 20 Minuten verdunkelt gehalten wurde. Dabei

[1] R. Foerster, Über Hemeralopie und die Anwendung eines Photometers in der Ophthalmologie. Breslau 1875.

ist aber vorausgesetzt, daß das Auge vor der Verdunklung nicht völlig hell adaptiert war, sondern sich in dem mittleren Adaptationszustand befand, wie er in mäßig hellen Zimmern sich einstellt.

Die Änderungsmöglichkeit der Blendenweite an Försters Instrument ist viel zu klein, um den Schwellenwert des Auges für jeden beliebigen Adaptationszustand messen zu lassen. Deshalb eignet sich der Apparat wohl für die augenärztliche Praxis, um gröbere Störungen der Adaptationsfähigkeit festzustellen, nicht aber für genauere Messungen.

Für solche Zwecke habe ich einen Apparat konstruiert, der als Adaptometer bezeichnet wird.[1] Die Figuren 58 u. 59 veranschaulichen seine Konstruktion.

An der Stirnseite eines 80 cm langen Holzkastens ist die als Beobachtungsobjekt dienende Milchglasscheibe $m_3$ angebracht, am entgegengesetzten Ende befindet sich die Lichtquelle, bestehend aus 3 Glühlampen zu 25 Kerzen. Im Gang der Lichtstrahlen befinden sich außer einer hellblauen Glasscheibe, die das Licht der Glühlampen möglichst rein weiß macht, zwei Vorrichtungen zur Abschwächung der Lichtintensität. Zunächst dem Lampenraum können drei Platten eingeschoben werden, die aus Metall bestehen und mit Löchern von solcher Größe versehen sind, daß jede der Scheiben die auf sie auffallende Lichtmenge auf $\frac{1}{20}$ vermindert. Die Einschiebung von zwei Scheiben vermindert also die Intensität auf $\frac{1}{400}$, die Einschiebung von allen drei auf $\frac{1}{8000}$. In der Mitte des Kastens befindet sich ferner zum Zweck der feineren Abstufung der Lichtintensität eine Quadratblende, wie im Försterschen Instrumente (vgl. die Abbildung S. 266), die mit Milchglas hinterlegt ist und von 1 qmm auf 10000 qmm erweitert werden kann. Die Lichtintensität, welche die vordere Milchglasscheibe trifft, kann also von ihrer Maximalhöhe auf $\frac{1}{8000} \cdot \frac{1}{10000} = \frac{1}{80000000}$

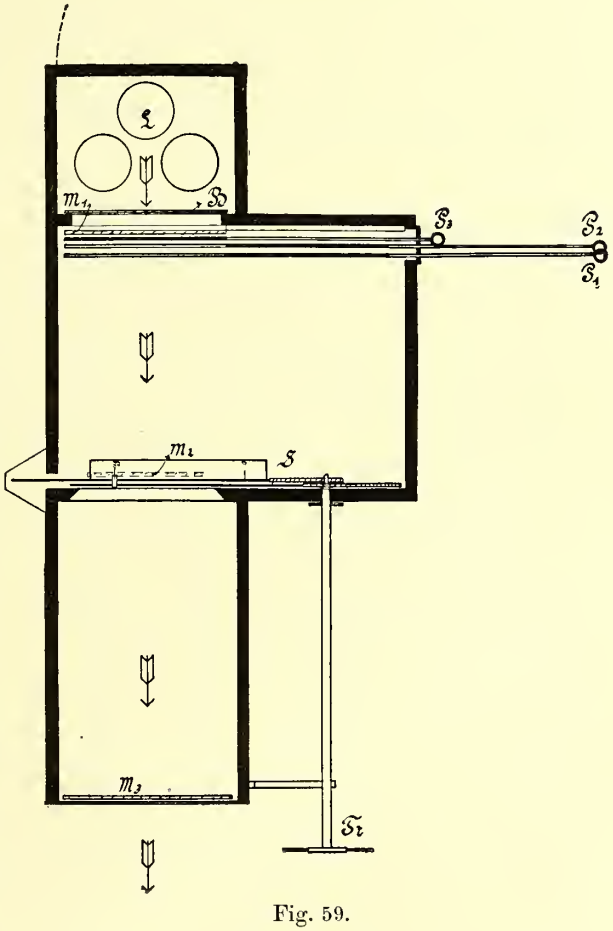



Fig. 59.

[1] W. Nagel, Zwei Apparate für die augenärztliche Funktionsprüfung usw. Zeitschr. f. Augenheilk. **17.** 1907.

vermindert werden, wovon der Bereich von 1 bis $\frac{1}{8000000}$ mit hinreichender Genauigkeit verwertet werden kann.

Einen ähnlichen Apparat hat H. Piper[1] beschrieben. Mittels derartiger Vorrichtungen läßt sich nun der Vorgang der Dunkeladaptation in seinem ganzen Verlauf verfolgen. Will man die Adaptationsfähigkeit verschiedener Personen mit gesunden und eventuell auch mit kranken Augen vergleichen, um den Adaptationsvorgang unter verschiedenen Bedingungen zu studieren, so empfiehlt es sich, die lichtaussendende Fläche des Adaptometers dem Beobachter unter einem ganz bestimmten und konstanten Gesichtswinkel darzubieten, da, wie wir sehen werden, die Reizschwelle von der Größe der gereizten Netzhautfläche abhängig ist. Ich habe dafür eine kreisförmige Fläche gewählt, die unter dem Gesichtswinkel von 10° erscheint. Setzt man vor die Milchglasscheibe des Adaptometers eine kreisförmige Blende von 10 cm Durchmesser, so hat der Beobachter sein Auge in 57 cm Entfernung vom Apparat zu bringen, um die leuchtende Fläche unter dem Winkel von 10° zu sehen; das ist insofern gerade eine bequeme Entfernung, als der Beobachter dann selbst in der Lage ist, mit der Hand den Griff des Instrumentes zu erfassen, an dem die Einstellung der Lichtintensität bewirkt wird. Will man nur feststellen, welcher Lichtreiz bei einem bestimmten Adaptationsgrad überhaupt wahrgenommen werden kann, so beobachtet man „mit wanderndem Blick", d. h. man bewegt die Augen, so daß das Bild der Adaptometerscheibe auf wechselnde Teile der Netzhaut fällt. Soll dagegen ein bestimmter Teil der Netzhaut auf seine Empfindlichkeit geprüft werden, so bietet man dem Auge einen Fixierpunkt in Form eines tief dunkelroten Pünktchens. Sendet dieses ein rein rotes Licht aus, so ist es in der Fovea centralis leichter sichtbar als in den peripheren Teilen der Netzhaut und zieht daher die Blickrichtung auf sich. Eine für diese Zwecke geeignete Vorrichtung habe ich a. a. O. beschrieben.

Um die Schwelle des Lichtsinnes bei guter Helladaptation zu erreichen, muß man bei dem beschriebenen Apparat schon ziemlich nahe an die größte Lichtintensität herangehen, die der Apparat liefern kann; es müssen alle drei Verdunklungsplatten herausgezogen werden.

Um solche „gute Helladaptation" zu erzielen, genügt es, 20 bis 30 Minuten sich im Freien bei sonnenhellem Wetter aufzuhalten, und dabei den Blick, ohne ihn eigentlicher Blendung auszusetzen, überwiegend auf helle Gegenstände zu richten. Nach einer solchen Vorbereitung ist nun für die meisten Augen die Reizschwelle nahezu dieselbe, und zwar kann als annähernd richtiger Wert eine Beleuchtungsintensität der Adaptometerscheibe gleich 1 Meterkerze angenommen werden; m. a. W. eine weiße Fläche, die unter 10° Gesichtswinkel gesehen wird, ist eben noch wahrnehmbar, wenn sie von einer Normalkerze aus 1 m Entfernung bestrahlt wird.

Will man nun hiermit die Empfindlichkeit im Zustande der Dunkeladaptation vergleichen, so begibt sich der Beobachter auf 1 Stunde in einen vollkommen dunklen Raum, oder er verschließt auf ebenso lange Zeit seine Augen durch einen lichtdichten Verband. Die Beleuchtungsstärke von 1 MK erscheint für die so dunkeladaptatierten Augen blendend hell; um den Schwellenwert zu

[1] H. Piper, Zur messenden Untersuchung und zur Theorie der Hell-Dunkeladaptation. Klin. Monatsbl. f. Augenheilk. 45, 357. 1907.

bestimmen, muß die Beleuchtung etwa auf $\frac{1}{50000}$ bis $\frac{1}{150000}$ herabgesetzt werden. Die Lichtempfindlichkeit ist also auf das 50000- bis 150000-fache gestiegen. Man kann das Maß der Zunahme, welche die Lichtempfindlichkeit nach vorheriger „guter Helladaptation" in einstündiger Dunkeladaptation erreicht, als die „Adaptationsbreite" des betreffenden Auges bezeichnen. Sie wird ausgedrückt durch die Zahl, die angibt, um wieviel die Schwelle des Hellauges höher ist als die des Dunkelauges. Die Adaptation ist allerdings nach einstündigem Lichtabschluß noch nicht an ihrem Ende angelangt, wie schon Aubert festgestellt hat und Piper und ich in vielfältigen Versuchen bestätigt haben. Piper[1] erreichte nach achtstündiger Dunkeladaptation beider Augen den doppelten Betrag der Lichtempfindlichkeit, den er nach einstündiger Adaptation gefunden hatte. Ich habe noch bei 16-stündigem Verschluß eines Auges wohl nicht die Grenze erreicht, bei der der Adaptationsprozeß zu Ende ist. Doch ist die Zunahme der Empfindlichkeit schon am Ende der zweiten Stunde nur noch gering. Die monokulare Adaptationsbreite betrug bei dem eben erwähnten Versuch 270000.

Bei nicht sehr hellem Wetter erreicht man den Helladaptationsgrad überhaupt nicht, bei dem 1 MK die Schwelle bildet; auch bedarf es ganz besonderer Vorbereitung und Einübung, um sehr schnell nach dem Übergang vom hellen in den dunklen Raum die erste Empfindlichkeitsmessung auszuführen. An etwas trüben Tagen findet man selbst nach einem Gang im Freien die Empfindlichkeit 10 bis 20mal höher, als bei voller Helladaptation. Vergleicht man den Zustand der Helladaptation, der bei trübem Tageslicht erreicht wird, mit dem Empfindlichkeitswert nach einstündigem Dunkelaufenthalt, so ergibt sich nur eine Zunahme auf das 3000 bis 8000-fache. Beginnt man die Untersuchung gar mit dem Adaptationszustand, wie er bei längerem Aufenthalt im Zimmer (bei Tag) sich einstellt, so findet man die Empfindlichkeit schon $= \frac{1}{1000}$ derjenigen, die nach 1 Stunde im Dunkeln erreicht wird. Im Zimmer entwickelt sich selbst an sonnenhellen Tagen längst nicht die volle Helladaptation, sondern die Empfindlichkeit ist etwa 100 bis 200mal größer als wenn wir uns im Freien aufhalten.

In pathologischen Fällen, bei der sog. Nachtblindheit oder Hemeralopie, einem Symptom mancher Augenerkrankungen, ist die Adaptationsbreite sehr bedeutend herabgesetzt. Messmer[2], der eine Anzahl hemeralopischer Patienten am Adaptometer untersuchte, fand für die Adaptationsbreite bei ihnen Werte von 125, 25, ja sogar 14, bei leichten Fällen 1250 und 1666, während die Werte für nichtkranke Beobachter zwischen 3332 und 10415 schwankten. Ähnliche Werte erhielten Heinrichsdorff u. A. (s. unten).

Die hier mitgeteilten Messungen der Lichtempfindlichkeit beziehen sich, wie besonders bemerkt sein möge, durchweg auf Augen mit intaktem Pupillenspiel. Um die Werte, die nach Helladaptation bestimmt sind, mit den nach längerer Dunkeladaptation zu vergleichen, müßte streng genommen die bei den einzelnen Messungen bestehende Pupillenweite bekannt

[1] H. Piper, Über Dunkeladaptation. Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. der Sinnesorgane. 31. 1903. 161—214.

[2] Messmer, Über die Dunkeladaptation bei Hemeralopie. Zeitschr. f. Sinnesphysiol. 42. 83. 1907.

sein, da wir sonst nicht die wirklichen Empfindlichkeitsgrade der Netzhaut in verschiedenen Zuständen vergleichen. Da indessen alle Messungen, auch die nach vorheriger Helladaptation, im verdunkelten Zimmer ausgeführt werden, ist der Einfluß der Pupillenweite ein geringer. Allerdings braucht die Pupille eine gewisse Zeit, um nach der Verdunkelung zur Ruhestellung, wie sie dem Lichtmangel entspricht, zu gelangen, aber diese Ruhe ist bei den hier in Betracht kommenden Messungen meistens schon erreicht.

Es gelingt mit Hilfe des Adaptometers oder ähnlicher Vorrichtungen, den Verlauf der Dunkeladaptation in seinen einzelnen Phasen genauer zu verfolgen, indem man nach Eintritt in das Dunkelzimmer in bestimmten Zwischenräumen, etwa alle 5 Minuten, den jeweiligen Schwellenwert ermittelt. Die reziproken Werte, als Ordinaten in ein Koordinatensystem eingetragen, dessen Abszissen die Zeit des Dunkelaufenthaltes bedeuten, ergeben die oben erwähnten „Adaptationskurven", wie sie von Aubert und anderen Forschern dargestellt sind. In der nachstehenden Tabelle gebe ich ein Beispiel für den typischen Verlauf der Dunkeladaptation bei normalem Auge. Die Fig. 60 stellt denselben Vorgang graphisch dar. Bei dem großen Umfang, den die Empfindlichkeitsänderung besitzt, kann freilich die Kurve kein ganz richtiges Bild davon geben, wenn nicht der Ordinatenmaßstab ungeheuer groß gewählt wird.

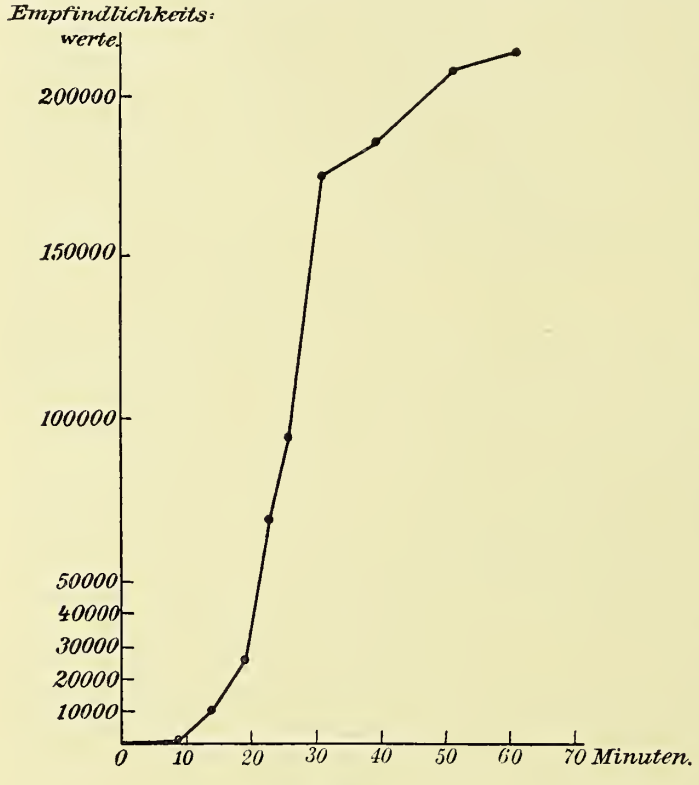



Fig. 60.

Die Kurve zeigt den steilsten Anstieg zwischen der 19. und 31. Minute, vorher und nachher flacheren Verlauf. Dies ist typisch für die normalen Adaptationskurven, deren Ordinate den jeweilen absoluten Empfindlichkeitsgrad abzulesen gestattet.

Es ist nicht ohne Interesse, den zeitlichen Gang der Zustandsänderung noch in anderer Weise zu betrachten, nämlich den verhältnismäßigen Zuwachs der Empfindlichkeit zum Gegenstande der Darstellung zu machen. Aus der Tabelle ist zu entnehmen, daß von der 4. bis 9. Minute die Empfindlichkeit auf rund den 25 fachen Betrag gestiegen ist, in der gleich langen Zeitspanne von der 9. bis 14. Minute nur auf den 5,6 fachen, in den 12 Minuten von der 19. bis 31. Minute auf den 6,7 fachen Betrag. Will man anstatt der ab-

Tabelle I. Empfindlichkeitszunahme bei Lichtabschluß.

| Dauer des Dunkelaufenthalts in Minuten | Empfindlichkeitswerte (die Empfindlichkeit, bei der die Lichtintensität 1 MK den Schwellenwert darstellt, ist = 1 gesetzt) |
|---|---|
| 0,5 | 20 |
| 4 | 75 |
| 9 | 1850 |
| 14 | 10400 |
| 19 | 26000 |
| 23 | 69500 |
| 26 | 94700 |
| 31 | 174000 |
| 39 | 195000 |
| 51 | 208000 |
| 61 | 215000 |

soluten Empfindlichkeitswerte die relativen Zuwüchse in diesem Sinne anschaulich zum Ausdruck bringen, so kann man dies unter Verwendung der Logarithmen der Empfindlichkeitswerte als Ordinaten tun. Die Vermehrung der Ordinate um einen bestimmten Wert zeigt alsdann die Steigerung der Empfindlichkeit in einem bestimmten Verhältnis (ihre Multiplikation mit einem bestimmten Koeffizienten) an, und die Kurve steigt am steilsten über demjenigen Punkt der Abszissenachse an, welcher dem schnellsten relativen Zuwachs der Lichtempfindlichkeit entspricht. Man erhält dann Kurven wie in Fig. 61. Ihre Steilheit ist also am Anfang größer, als in der Mitte der Stunde, während deren Dunkeladaptation bewirkt wird. Das Maximum der Steilheit pflegt zwischen der 2. und 8. Minute zu liegen, wo die Kurve (Fig. 60) gerade einen noch sehr flachen Verlauf zeigt.

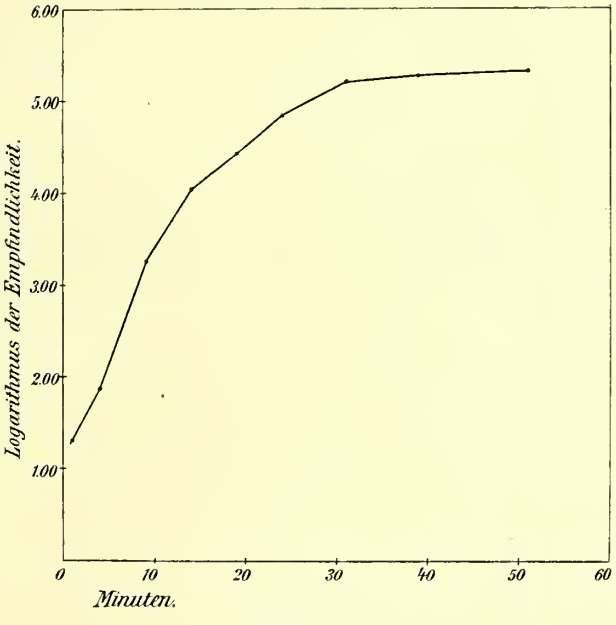



Fig. 61.

Vergleicht man die Adaptation bei einer größeren Zahl von Personen mit gesunden Augen, so findet man den Verlauf bei allen sehr ähnlich, und nur die erreichte Endhöhe wechselt. Bei denjenigen Augenerkrankungen dagegen, bei denen Hemeralopie auftritt (s. o. S. 269), ist häufig nicht nur die nach Verlauf einer Stunde erreichte Empfindlichkeit viel geringer als beim Normalen, sondern es kann auch der Verlauf der Adaptationskurven ein abnormer sein. Besonders häufig findet man einen auffallend flachen Verlauf in der ersten Viertelstunde, also einen verlangsamten Anstieg, während nach Verlauf einer

Stunde die erreichte Empfindlichkeit in normalen Grenzen liegen kann. Solche Patienten empfinden es als höchst lästig, daß sie beim Übergang aus einem hellen in einen dämmerigen Raum viel langsamer als Gesunde sich an die geringe Helligkeit „gewöhnen" können, und zunächst fast gar nichts sehen. In den schwereren Fällen nimmt auch im Laufe von Stunden die Empfindlichkeit nur ganz wenig zu, und diese Patienten sind dann natürlich in der Dämmerung noch hilfloser.

Näheres über die Adaptation in pathologischen Fällen findet sich in den Arbeiten von Heinrichsdorff[1], Messmer[2], Lohmann[3] und Horn[4].

Eine merkliche Abhängigkeit der Adaptationsbreite oder des Adaptationsverlaufs vom Lebensalter besteht nach den Untersuchungen von Piper (l. c.) und Wölfflin[5] nicht. Auch hat sich die Angabe Tschermaks[6], daß den verschiedenen Typen des Farbensinns besondere Eigentümlichkeiten der Dunkeladaptation entsprechen, nicht bestätigt. Es steht vielmehr fest, daß das Adaptationsvermögen mit dem Typus des Farbensystems nichts zu tun hat und normale sowie anomale Trichromaten hierin mit den partiell Farbenblinden (Dichromaten) übereinstimmen. Auch die sogenannten Achromaten oder Totalfarbenblinden nehmen hierin keine abweichende Stellung ein. Bei einem totalfarbenblinden Mädchen fanden May[7] und ich die Adaptationsbreite unter der Durchschnittshöhe, doch noch in normalen Grenzen (ca. 5000).

Von anderen Einflüssen, die den Gang der Dunkeladaptation zu modifizieren vermögen, ist die Wirkung der Nervengifte Strychnin und Brucin zu nennen. Beide bewirken, subkutan injiziert, nach Dresers[8] und Wölfflins[9] Versuchen eine deutliche Erhöhung der Adaptationsbreite um $^1/_5$ bis $^1/_4$. Auch erschien die Adaptationsgeschwindigkeit erhöht. Vom Strychnin wandte Wölfflin Dosen von 0,002 bis 0,005 g an, von Brucin 0,02 g. Das Santonin, dem von Filehne[10] ein verzögernder Einfluß auf die Adaptation zugeschrieben worden ist, besitzt einen solchen tatsächlich nicht, wie Knies[11] und Wölfflin (l. c.) gefunden haben. Auch ich habe zusammen mit Herrn Dr. Vaughan[12] eine größere Zahl von

---

[1] Heinrichsdorff, Die Störungen der Adaptation und des Gesichtsfeldes bei Hemeralopie. Graefes Arch. f. Ophthalm. **60**. 405. 1905.

[2] Messmer, Über die Dunkeladaptation bei Hemeralopie. Zeitschr. f. Sinnesphysiol. **42**. 83. 1907.

[3] Lohmann, Untersuchungen über die Adaptation usw. Habilitationsschrift, München und Graefes Archiv f. Ophthalm. **65**, 1907.

[4] Horn, Über Dunkeladaptation bei Augenhintergrundserkrankungen. Dissertation, Tübingen 1907.

[5] Wölfflin, Der Einfluß des Lebensalters auf den Lichtsinn bei dunkeladaptiertem Auge. Graefes Arch. f. Ophthalm. **61**, 524, 1905.

[6] Tschermak, Über physiologische und pathologische Anpassung des Auges. Leipzig (Veit u. Co. 1900), ferner: Ergebnisse der Physiologie I, 2. S. 700. 1902.

[7] May, Ein Fall totaler Farbenblindheit. Zeitschr. f. Sinnesphysiol. **42**, 69. 1907.

[8] Dreser, Über die Beeinflussung des Lichtsinns durch Strychnin. Arch. f. exp. Pathol. u. Pharm. **33**.

[9] Wölfflin, Über die Beeinflussung der Dunkeladaptation durch künstliche Mittel Graefes Arch. für Ophthalm. **65**. 302. 1907. Vergl. auch Singer Brucin und seine Einwirkung auf das normale Auge. Ebenda **50**.

[10] Filehne, Über die Wirkung des Santonins usw. Pflügers Arch. f. d. ges. Physiol. **80**. 96. 1900.

[11] M. Knies, Über die Farbenstörung durch Santonin. Arch. f. Augenheilk. **37**.

[12] C. L. Vaughan, Einige Bemerkungen über die Wirkung des Santonins auf die Farbenempfindungen. Zeitschr. f. Sinnesphysiol. **41**, 399. 1906.

Versuchen mit schwacher und starker Santoninvergiftung angestellt und keinerlei Wirkung auf die Adaptation feststellen können.

Eine indirekte Wirkung besitzen die Mydriatica insofern, als die z. B. durch Atropin erweiterte Pupille abnorm große Lichtmengen ins Auge gelangen und einen Zustand der Blendung entstehen läßt. Ich habe einige Male eines meiner Augen bei erweiterter Pupille dem von einer sonnenbeschienenen Straße zurückgeworfenen Licht während etwa $^1/_2$ Stunde ausgesetzt und fand dann den Anstieg der Adaptationskurven stark verzögert. Der erste flache Teil der Empfindlichkeitskurven, wie er in den Kurven von Piper (auch in der oben S. 270 abgebildeten Kurve) zum Ausdruck kommt, erstreckt sich statt über 8—10 Minuten über deren 20. Danach stieg jedoch die Empfindlichkeit schnell an, und erreichte nach 70—80 Minuten die normale Höhe.

Schon Aubert hat die seither in meinem Laboratorium vielfach bestätigte Beobachtung gemacht, daß das Fortschreiten der Dunkeladaptation durch die kurzdauernde Einwirkung merklich überschwelligen Lichtes nicht nur nicht gehemmt wird, sondern sogar eine gewisse Begünstigung erfährt. Man kann sich leicht davon überzeugen, daß das Anstreichen eines Zündhölzchens, dessen Licht von dunklen Zimmerwänden in das Auge des Beobachters zurückgeworfen wird, den Schwellenwert des Lichtsinnes erheblich, bis um $^1/_3$ erniedrigt. Erst nach einigen Minuten ist diese Wirkung abgelaufen. Besonders deutlich kommt sie zum Ausdruck, wenn der Beobachter durch einstündigen Aufenthalt im Dunkeln schon auf einen fast stationären Adaptationszustand gelangt ist.

In eigentümlichem Gegensatz hierzu steht die Tatsache, daß durch sehr langen Lichtabschluß ein Empfindlichkeitsgrad erreicht wird, der durch Reize, die ganz nahe der Schwelle liegen, schon vermindert wird. So ist die oben erwähnte höchste Empfindlichkeit, die nach 16 stündigem lichtdichtem Verschluß eines Auges bei mir sicher konstatiert wurde und bei der die Beleuchtung des Adaptometerfeldes mit $^1/_{270000}$ MK den Schwellenwert bildete, nur flüchtiger Natur; wenige Beobachtungen, bei denen das Auge nur Reizen von höchstens der dreifachen Größe des Schwellenwertes ausgesetzt war, reichten aus, um die Empfindlichkeit auf etwa die Hälfte zu erniedrigen. Ähnliche Beobachtungen habe ich wiederholt gemacht und man kann sagen, daß der Zuwachs an Empfindlichkeit, der sich nach mehr als einstündigem Dunkelaufenthalt noch nachweisen läßt, weit vergänglicherer Natur ist, als der Zuwachs während der ersten Stunde.

Irgendein Einfluß des Adaptationszustandes des einen Auges auf den des anderen Auges läßt sich nicht mit Sicherheit nachweisen, die Dunkeladaptation geht vielmehr in jedem Auge unabhängig vor sich. Wenn man gelegentlich den Eindruck gewinnt, als erreichte man bei Lichtabschluß nur eines Auges nicht ganz die gleiche Empfindlichkeit, wie bei binokularer Adaptation aber monokularer Beobachtung, so beruht das zum Teil auf den störenden subjektiven Lichterscheinungen, die besonders leicht auftreten, wenn der Adaptationszustand beider Augen ungleich ist, zum anderen Teil wohl auch darauf, daß es schwerer ist, als man zunächst denken sollte, ein Auge so lichtdicht zu verbinden, daß es auch nach längerer Adaptation keinen Lichtschimmer mehr wahrnimmt. Bei Untersuchungen über diese Frage muß berücksichtigt werden, daß im Zustand der Dunkeladaptation die Reizschwelle beim Sehen mit nur einem Auge höher gefunden wird, als bei binokularem Sehen (s. u. S. 286).

Ob die Augen während der Dunkeladaptation frei sind oder unter einem mehr oder weniger stark drückenden Verband gehalten werden, ist für den erzielten Empfindlichkeitsgrad ohne Bedeutung[1]. Auch Durchströmung des Auges mit auf- oder absteigendem galvanischem Strom fanden meine Mitarbeiter und ich ohne Wirkung auf die Lichtreizschwelle. Eine Reizbarkeitsveränderung im Sinne des Elektrotonus ist also nicht nachweisbar.

## 2. Die Helladaptation.

Die mit dem Vorgang der Helladaptation verbundene Abnahme der Lichtempfindlichkeit läßt sich lange nicht so bequem beobachten, wie der umgekehrte Prozeß, da ja die Empfindlichkeit präzise nur durch Schwellenbestimmungen gemessen werden kann und diese wiederum den Aufenthalt in einem dunklen Raum zur Voraussetzung haben. Eine messende Untersuchung der Empfindlichkeitsabnahme bei Helladaptationen kann also nur in der Weise erfolgen, daß zunächst nach längerem Dunkelaufenthalt der Schwellenwert bestimmt wird, wonach der Beobachter seine Augen eine bestimmte Zeit lang stärkerem Lichte aussetzt, diese Helladaptation dann plötzlich abbricht und nun im wieder verdunkelten Raum schnell abermals eine Schwellenbestimmung vornimmt, ehe wieder die Dunkeladaptation merklich einsetzt. Auf diese Weise gelingt es, festzustellen, um welchen Betrag die Lichtempfindlichkeit durch eine bestimmte Belichtungsintensität von bestimmter Dauer herabgesetzt wird. W. Lohmann[2] hat sich der nicht geringen Mühe unterzogen, derartige Messungen in großer Zahl auszuführen, und zwar unter systematischer Variierung einerseits der Intensität des zur Helladaptation dienenden Lichtes, und andererseits der Zeit, während welcher das Auge diesem Licht exponiert wurde. Indem Lohmann den oben beschriebenen Versuch einmal mit eine Minute dauernder Helladaptation anstellte, sodann, nach Wiederherstellung des Dunkeladaptationszustandes, mit 2, 3, 6 usf. Minuten, gewann er ein Bild von dem Ablauf des Helladaptationsprozesses für die gewählte Beleuchtungsintensität. Der Ausgangspunkt seiner Beobachtungen war stets ein Dunkeladaptationszustand, bewirkt durch $^3/_4$ stündigen Lichtabschluß. Da bei voller Tageshelligkeit die Adaptation, wie schon erwähnt, sich außerordentlich schnell abspielt, und wahrscheinlich unter Umständen schon nach einer Minute ihr Ende erreichen kann, hat Lohmann seine Versuche hauptsächlich mit mäßigeren Beleuchtungsintensitäten angestellt, bei denen der Ablauf des Prozesses sich besser verfolgen läßt. Es ist bei derartigen Beobachtungen zu berücksichtigen, daß nach dem Löschen des zur Helladaptation dienenden Lichtes alsbald die Empfindlichkeit wieder zu steigen beginnt, und zwar um so schneller, je mäßiger die Helladaptation war. Darum muß die Schwellenbestimmung möglichst bald nach der Verdunkelung erfolgen. Zu früh darf sie aber auch nicht geschehen, da in den ersten Sekunden nach der Verdunkelung die wechselnden Nachbildphasen die Beobachtung ungemein erschweren.

Aus diesen Gründen erwähne ich von den Lohmannschen Messungen in erster Linie diejenigen, bei denen die Schwellenbestimmung 10 Sekunden nach der Verdunkelung erfolgte. Sicherlich ist während dieser Zeit die Emp-

[1] Nagel, Einige Beobachtungen über die Wirkung des Druckes und des galvanischen Stromes auf das dunkeladaptierte Auge. Zeitschr. f. Psychol. und Physiol. d. Sinnesorgane. **34**. 285. 1904.

[2] W. Lohmann, Über Helladaptation. Zeitschr. f. Sinnesphysiol. **41**. 290. 1906.

findlichkeit schon etwas gestiegen und zwar nach verschieden langer Helladaptation in verschiedenem Maße; dies ist indessen ein Fehler, der kaum zu vermeiden ist, übrigens aber den Wert der Versuche Lohmanns nicht vermindert. Die Schwierigkeit der Aufgabe zwingt uns hier, mit Annäherungsbestimmungen vorlieb zu nehmen.

**Tabelle II.**

Abnahme der Lichtempfindlichkeit bei Helladaptation unter verschieden starker Beleuchtung und bei verschiedener Dauer der Helladaptation.

| Intensität der Beleuchtung der weißen Fläche, auf die der Beobachter zum Zwecke der Helladaptation hinblickte. | Dauer der Helladaptation. | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1/3 Min. | 2/3 Min. | 1 Min. | 2 Min. | 3 Min. | 6 Min. | 10 Min. |
| | Empfindlichkeitswerte | | | | | | |
| 5 Meterkerzen . . . . | 23000 | 17500 | 10400 | 8130 | 5200 | 3470 | 3000 |
| 25 „ . . . . | 9950 | 7440 | 5200 | 3360 | 2740 | 2040 | 1450 |
| 50 „ . . . . | 5800 | 3700 | 3250 | 2600 | 2038 | 1600 | 1130 |
| mittlere Tageshelligkeit . . | 435 | 230 | 200 | 115 | 87 | 48 | 40 |

Ich gebe hier eine Tabelle nach Messungen von W. Lohmann wieder, in der ich statt der vom Autor angegebenen Schwellenwerte die auf die Einheitsempfindlichkeit (Schwelle bei 1 MK) reduzierten Empfindlichkeitswerte eingesetzt habe. Fig. 62 veranschaulicht das Ergebnis in Kurvenform. Man sieht, wie die Kurve der Empfindlichkeit schon in der ersten Minute jäh abfällt und bei der Adaptation für diffuses reflektiertes Tageslicht bereits nach 1/3 Minute enorm gesunken ist. Die Ordinate, die dem Empfindlichkeitsgrad vor Beginn der Helladaptation entsprechen würde, müßte etwa 5 mal so hoch sein, wie der höchste Ordinatenwert der in der Figur dargestellten Kurven.

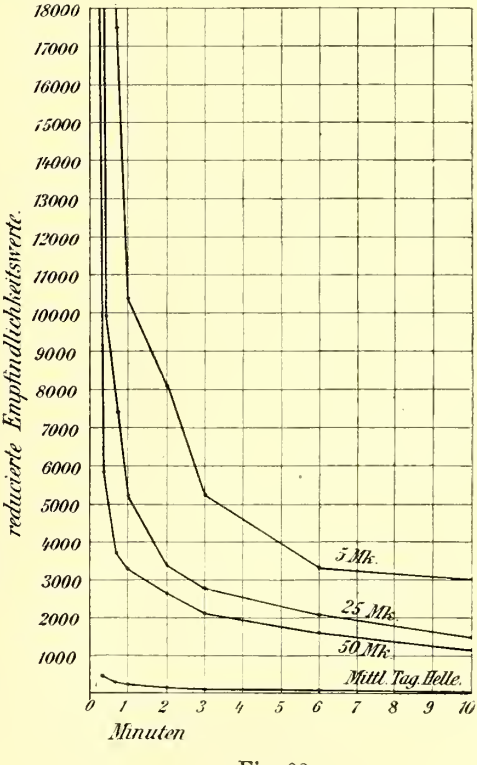



Fig. 62.

Man bemerkt ferner an den Kurven, wie sie nach dem steilen Absinken sich im Bogen zu einem weit weniger steilen Verlauf wenden. Die Helladaptation geht also auch nach den ersten 2 Minuten noch weiter, wenn auch sehr langsam; immerhin kommt selbst in der Adaptation für Tageslicht noch ein Absinken der Empfindlichkeit bis zur 10. Minute zum Ausdruck. Man könnte nach den Eindrücken des täglichen Lebens vermuten, es werde sich besonders bei Einwirkung geringer Lichtintensitäten die Empfindlichkeit schnell auf ein bestimmtes Niveau einstellen, was sich durch horizontalen Verlauf der Kurven

äußern müßte. Dem ist aber, wie Lohmanns Versuche zeigen, nicht so. Für die Beleuchtungen von 25 und 50 MK hat Lohmann die Versuche noch weiter ausgedehnt und die in der nachstehenden Tabelle wiedergegebenen Werte erhalten. Ich habe sie wiederum auf reduzierte Empfindlichkeitswerte umgerechnet:

**Tabelle III.**

Abnahme der Lichtempfindlichkeit bei länger dauernder Helladaptation.

| Dauer der Helladaptation in Minuten | 10 | 15 | 29 | 34 | 39 | 49 | 60 | 70 | 79 | 80 | 99 | 109 | 110 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 25 MK | 1450 | 1000 | | 250 | | 125 | 95 | 62 | | 54 | | | 54 |
| 50 MK | 1130 | 312 | 104 | | 46 | | 36 | | 28 | | 25 | 24 | |

Die Tabelle und die Fig. 63 zeigen ein weiteres Sinken der Empfindlichkeit noch nach der 10. Minute, und erst nach halbstündiger Adaptation eine Art Plateau, das übrigens bemerkenswerterweise verschieden hoch liegt je nach der Intensität des Lichts, auf das adaptiert wurde. Der Koordinatenmaßstab ist in den beiden Figuren 62 und 63 aus äußeren Gründen verschieden gewählt worden, da aber in beiden Fällen die Ordinatenzahlen reduzierte Empfindlichkeitswerte in dem oben definierten Sinn darstellen, sind die Kurven doch leicht vergleichbar, auch mit den Kurven der Dunkeladaption, S. 270.

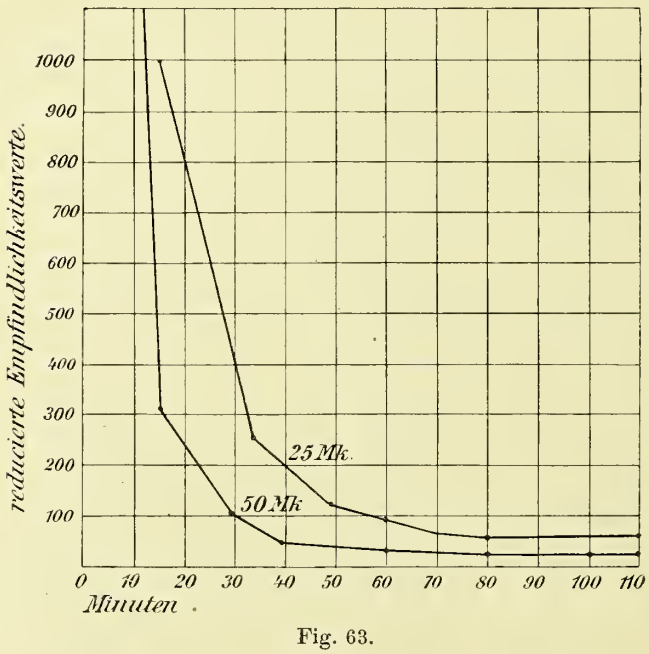



Fig. 63.

Davon, daß mäßige Lichtintensitäten die Wirkung der Dunkeladaptation nur langsam vernichten, überzeugt man sich leicht, indem man eines der beiden Augen während $^1/_2$ Stunde lichtdicht verbunden läßt, und das andere solange dem zerstreuten Tageslicht aussetzt. Nach Abnahme des Verbandes sinkt die Empfindlichkeit des verschlossen gewesenen Auges schnell bis zu einem gewissen Grade, bleibt aber dann, wenn die Helligkeit im Zimmer eine gedämpfte ist, noch eine halbe bis ganze Stunde merklich größer, als die des nicht verschlossen gewesenen Auges, wie man durch abwechselndes Öffnen und Schließen der Augen erkennt.

Allen quantitativen Angaben über Helladaptation, die ich im Vorstehenden gemacht habe, liegt stets die Messung des Schwellenwertes 10 Sekunden nach Löschung des Helladaptationslichts zugrunde. Eine andere Versuchsreihe von

Lohmann gibt nun auch ein Bild von dem Anstieg der Empfindlichkeit in den ersten Minuten nach der Verdunklung oder m. a. W. von der Nachwirkung der Helladaptation auf die erste Zeit der Dunkeladaptation. Auf die Methodik dieser Versuche gehe ich nicht im einzelnen ein, sondern gebe nur in Figur 64 die Darstellung des Dunkeladaptationsverlaufs nach vorgängiger Helladaptation bei einer Beleuchtungsintensität von 75 MK. Der Beobachter, der sich vorher gut dunkeladaptiert hatte, richtete seinen Blick 1, 2, 3, 6 oder 10 Minuten auf eine weiße Fläche, die mit 75 MK bestrahlt war, und bestimmte dann den Wiederanstieg der Empfindlichkeit während der ersten 4 Minuten im Dunkeln. Die erste Messung erfolgte nach 10 Sekunden. In der Figur sind als Abszissen die Sekunden nach Schluß der Helladaptation eingetragen, als Ordinaten die Empfindlichkeitswerte, die hier relative sind, auf diejenigen der früher mitgeteilten Adaptationskurven aber dadurch wenigstens annähernd bezogen werden können, daß die höchste Ordinate der Figur einem reduzierten Empfindlichkeitswert von etwa 16000 entspricht. Die Figur 64 bringt deutlich zum Ausdruck, wie nach kurzer, nur 1 Minute dauernder Helladaptation die Empfindlichkeit schneller wieder aufsteigt, als nach längerer Einwirkung der 75 MK Beleuchtung. Wenn die Helladaptation bei geringeren Intensitäten erfolgt, werden die Kurven noch steiler und beginnen gleich mit höheren Ordinaten.

Fig. 64.

Unter Berücksichtigung der Schnelligkeit, mit der die Lichtempfindlichkeit einer in mäßigem Grade helladaptierten Netzhaut sofort nach dem Lichtabschluß und auch bei plötzlichem Übergang in einen schwach beleuchteten Raum in die Höhe geht, erklärt sich leicht die folgende Beobachtung, die als eine besondere Nachbilderscheinung bezeichnet werden kann. Tritt man von der Straße in einen dämmerigen Hausflur und fixiert dort einige Sekunden ein Objekt, das starke Helligkeitsunterschiede aufweist (z. B. eine helle Wand mit einer Inschrift aus großen Lettern), so stellt sich ein sehr lebhaftes Nachbild ein, das stets negativ ist. Dieses entsteht dadurch, daß an denjenigen Netzhautstellen, auf denen sich die dunklen Teile des Objekts (z. B. die Lettern) abbildeten, die adaptative Empfindlichkeitszunahme schneller vor sich gegangen ist, als an den stärker belichteten. Vorbedingung ist also ein Adaptationsstadium, in dem die Empfindlichkeit sehr schnell ansteigt. Befindet sich der Beobachter in einem einigermaßen stationären Adaptationszustand, und bei einer Beleuchtungsintensität, die subjektiv gleich hell erscheint, wie in dem eben beschriebenen Versuch in dem dämmerigen Hausflur, so wird er sich vergeblich bemühen, negative Nachbilder von erheblicher Intensität zu erzeugen; es bedarf dann vielmehr weit stärkerer Reize dazu.

Ich habe Herrn H. J. Watt[1] veranlaßt, die Entstehung und den Ablauf nega-

[1] H. J. Watt, Über die Nachbilder subjektiv gleich heller aber objektiv verschieden stark beleuchteter Flächen. Zeitschr. f. Sinnesphysiol. **41**, 312. 1906.

tiver Nachbilder vergleichend an einem helladaptierten und einem gut dunkeladaptierten Auge bei subjektiv gleicher Helligkeit zu untersuchen. Hierbei konnte ein erheblicher Unterschied zwischen Hell- und Dunkelauge nicht gefunden werden; es ist vielmehr gerade das Stadium des schnellen Anstiegs der Empfindlichkeit bei beginnender Dunkeladaptation, das die Entstehung jener eigenartigen negativen Nachbilder besonders begünstigt.

### 3. Die örtlichen Unterschiede in der Empfindlichkeit der Netzhaut.

Tritt man mit einem mittleren Adaptationsgrade in ein dunkles Zimmer, in dem sich ein sehr schwach leuchtendes Objekt befindet, so konstatiert man leicht, daß man dieses mit den peripheren Teilen der Netzhaut besser wahrnimmt, als mit den zentralen Teilen. Ist das lichtaussendende Objekt klein, so daß es etwa unter dem Gesichtswinkel von $1^0$ bis $2^0$ gesehen wird, so bleibt jener Unterschied zwischen peripherem und zentralem Sehen auch nach längerer Dunkeladaptation bestehen, ja er erhöht sich noch. Bei Objekten dagegen von $10^0$ und mehr Winkelgröße (z. B. der Scheibe des Adaptometers) verschwindet bei längerem Dunkelaufenthalt der Unterschied zwischen Netzhautmitte und Peripherie immer mehr und ist nach einstündiger Adaptation nur noch sehr gering. Genauere Untersuchungen haben als Grund dieser Erscheinung folgendes ergeben.

Die Netzhautmitte, die sog. Fovea centralis, verhält sich hinsichtlich der Adaptationsvorgänge ganz anders als die übrige Netzhaut; sie macht zwar die in den ersten 2 bis 3 Minuten des Lichtabschlusses stattfindende sehr schnelle Empfindlichkeitssteigerung mit der übrigen Netzhaut mit, bleibt aber dann auf dem erreichten Empfindlichkeitsgrad stehen, während in den anderen Teilen dann erst die mächtigste Steigerung der Lichtempfindlichkeit einsetzt. Der foveale Netzhautbezirk verhält sich also ganz analog der Gesamtnetzhaut eines an hochgradiger Hemeralopie leidenden Auges, und man kann mit v. Kries geradezu von einer „physiologischen Hemeralopie" der Fovea sprechen.

Aus dieser Hemeralopie der Fovea erklärt sich ohne weiteres die erwähnte Tatsache, daß im Dunkeladaptationszustand kleine Objekte peripherisch besser gesehen werden, als foveal. Daß schon beim Eintritt ins Dunkelzimmer die Peripherie zum Sehen lichtschwacher Objekte (auch von überfovealer Größe) besser befähigt ist als die zentralen Partien, erklärt sich auf andere Weise: auch wenn wir uns nämlich in einem hellen Raume aufhalten, gelangt zu den ganz peripherischen Teilen der Netzhaut, in die Äquatorialgegend, im allgemeinen wesentlich weniger Licht, als zur Mitte des Augengrundes, und die Peripherie befindet sich daher in einem mehr der Dunkeladaptation angenäherten Zustand, sie ist deshalb im dämmerigen Raume von vornherein besser zur Wahrnehmung schwacher Lichtreize befähigt.

Systematische Untersuchungen über die Verteilung der Lichtempfindlichkeit auf der dunkeladaptierten Netzhaut hat v. Kries[1]) ausführen lassen. Das Auge des Beobachters fixierte einen winzigen leuchtenden Fixierpunkt, und ein kleines weißes Objekt, dessen Beleuchtung beliebig abgestuft werden konnte, wurde dem Auge in verschiedenen Seitenabständen vom Fixierpunkt dargeboten. Es

[1] J. v. Kries, Über die absolute Empfindlichkeit der verschiedenen Netzhautteile im dunkeladaptierten Auge. Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **15**, 327. 1897. Von früheren Untersuchungen sind namentlich zu nennen diejenigen von Guillery, in Zeitschr. f. Psychol. usw. **12**, 261, 1896; **13**, 187, 1897; Pflügers Archiv f. d. ges. Physiol. **66**, 401, 1897.

ließ sich auf diese Weise für die einzelnen Netzhautstellen die Empfindlichkeit vergleichend feststellen.

Tabelle IV und Fig. 65 veranschaulichen das Ergebnis dieser Messungen in einem kleinen Bezirk der Netzhautmitte, der sich rechts und links je 4° vom Fixierpunkt aus erstreckt.

Das Objekt hatte bei diesen Versuchen einen Durchmesser von 0,35° und wurde mit bläulichweißem Lichte beleuchtet.

Tabelle IV.

| Empfindlichkeit (relative Werte) | Temporaler Abstand in Graden | Nasaler Abstand in Graden | Breite des Verschwindungsbezirks in Graden |
|---|---|---|---|
| 1 | 1,07 | 0,85 | 1,92 |
| 1,78 | 1,22 | 1,06 | 2,28 |
| 7,12 | 1,70 | 1,36 | 3,08 |
| 16,02 | 2,3 | 1,92 | 4,22 |
| 28,48 | 3,0 | 2,50 | 5,58 |
| 44,50 | 3,75 | 3,33 | 7,08 |
| 64,08 | 4,04 | 4,04 | 8,08 |

Wie man sieht, steigt etwas weiter als 1° abseits vom Fixierpunkt die Empfindlichkeit rapide an, und in der Mitte bleibt das etwa 2° im Durchmesser haltende foveale Feld von geringster Empfindlichkeit. Noch weiter peripheriewärts nimmt im gleichmäßig dunkeladaptierten Auge die Lichtempfindlichkeit noch weiter zu und erreicht nach den Untersuchungen von v. Kries und seinen Schülern bei 10° bis 20° Exzentrizität ein Maximum. So fanden Breuer und ich in gemeinsamen Versuchen, daß, wenn die Empfindlichkeit bei 6° Abstand vom Fixierpunkt = 1 gesetzt wurde, sie temporal bei 12° auf den Wert 1,38, bei 18° auf 1,64 stieg; nasal bei 12° auf 1,54 stieg, bei 18° aber schon wieder auf 1,37 sank. Vergleichszahlen zwischen der Empfindlichkeit im fovealen und im extrafovealen Gebiet haben, wie weiter unten zu zeigen sein wird, nur für eine bestimmte Lichtqualität Gültigkeit. Bei 10° Exzentrizität und guter Dunkeladaptation fand Pertz (vgl. v. Kries, l. c.) die Empfindlichkeit für blaues Licht (8,6′ Gesichtswinkel) etwa 1400mal größer als in der Fovea. Für gemischtes weißes Licht bei $^1/_2{}^0$ Gesichtswinkel finde ich nach einstündiger Adaptation die Empfindlichkeit an dem empfindlichsten Teil der Peripherie rund 1000mal größer als in der Fovea unter den gleichen Umständen. Es muß hier gleich darauf hingewiesen werden, daß im helladaptierten Auge die Verteilung der Empfindlichkeit eine wesentlich andere ist, indem das Maximum der Lichtempfindlichkeit in der Fovea centralis liegt. Man überzeugt sich hiervon leicht, wenn man in einem dunklen Zimmer ein Lichtpünktchen herstellt, dessen Intensität wenig über der fovealen Schwelle liegt. Betritt man im gut helladaptierten Zustand das Dunkelzimmer, so findet man das Pünktchen nur sehr schwer, gewissermaßen zufällig, mit dem Blick, sieht es dann aber, nach-

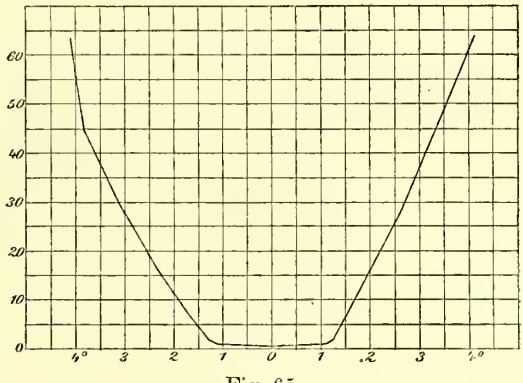


Fig. 65.

dem man es einmal erblickt hat, überraschend deutlich, verliert es allerdings auch wieder leicht aus dem Gesicht. Im Gegensatz dazu sieht das dunkeladaptierte Auge ein solches Pünktchen sofort sehr leicht, weil die Empfindlichkeit in den extrafovealen Netzhautteilen größer als in der Fovea ist.

Für das helladaptierte Auge liegen genauere Messungen über die Abnahme der Empfindlichkeit von der Fovea nach der Peripherie unter genügender Berücksichtigung des Adaptationszustands nur für farbige Lichter vor. Da aber in den Beobachtungen, die ich durch C. L. Vaughan und A. Boltunow[1] über die Verteilung der Empfindlichkeit für farbige Lichter auf der helladaptierten Netzhaut habe anstellen lassen, sich die Abnahme der Empfindlichkeit nach der Peripherie hin für rote, grüne und blaue Lichter als durchaus gleichartig herausgestellt hat, wird man wohl auch das Quantitative an den Ergebnissen dieser Beobachter unbedenklich auf jede beliebige Lichtart übertragen dürfen. Vaughan und Boltunow fanden die Empfindlichkeit $10^0$ abseits von der Foveamitte nur noch $= {}^1/_4$, bei $20^0 = {}^1/_{10}$, bei $35^0 = {}^1/_{40}$ der fovealen Empfindlichkeit.

Das relative zentrale Skotom des dunkeladaptierten Auges. Lichtreize, deren Intensität unter dem Schwellenwert der Netzhautmitte liegt, werden, wie wir sahen, in einem Bezirk von etwa zwei Winkelgraden nicht gesehen, während sie alsbald wahrgenommen werden, falls sie abseits von diesem Bezirk auf die durch Dunkeladaptation empfindlicher gemachte Netzhaut wirken. Für Lichtreize von noch geringerer Intensität ist der Bezirk, in welchem sie nicht wahrgenommen werden können, entsprechend größer. Der vierte Stab der Tabelle IV (S. 279) gibt für die dort benützten Lichtintensitäten die Größe des „Verschwindungsbezirks“ an.

In der Ophthalmologie bezeichnet man als Skotome solche Stellen des Gesichtsfeldes, von denen aus keine Lichtempfindung im Auge ausgelöst werden kann, und zwar spricht man von absolutem Skotom dann, wenn keine noch so große Lichtintensität an dieser Stelle erregend wirkt, von relativem Skotom, wenn die betreffende Stelle der Netzhaut merklich stärkerer Reize zur Erregung bedarf, als die umgebenden Partien. In diesem Sinne entspricht im dunkeladaptierten Auge der Fovea centralis ein relatives Skotom im Gesichtsfeld.

Von dem Vorhandensein dieses Skotoms überzeugt man sich sehr leicht, sobald ein genügender Grad von Dunkeladaptation besteht. So ist es z. B. eine alte Erfahrung der Astronomen, daß man lichtschwache Sterne besser wahrnimmt, wenn man etwas an ihnen vorbeiblickt, d. h. ihr Bild neben die Fovea fallen läßt. Am schärfsten sieht man das, wenn man ein Sternbild betrachtet, das dicht beisammen einige helle und einige weniger helle Sterne enthält, z. B. das der Plejaden, in welchem man bei direkter Fixation vier oder höchstens fünf Sterne sieht, während beim Vorbeigleiten des Blickes sogleich eine ganze Anzahl schwächerer Sterne sichtbar wird. Wenn man in klaren Nächten den Himmel mit seiner Unzahl von Sternen betrachtet, ist man überrascht, wieviele von den Sternen unsichtbar werden, sobald man den Blick direkt auf sie richtet. Es gelingt nicht allen Beobachtern gleich leicht, sich von dem Vorhandensein des relativen zentralen Skotoms zu überzeugen. Der Grund liegt in der Schwierigkeit, den Blick auf ein Objekt zu richten, das

[1] Vaughan u. Boltunow, Über die Verteilung der Empfindlichkeit für farbige Lichter im helladaptierten Auge. Zeitschr. f. Sinnesphysiol. **42**, 1, 1907. Vgl. hierzu auch Guillery, Zeitschr. f. Psychol u. Physiol. d. Sinnesorg. **12**, 261. 1896; **13**, 189. 1897.

gerade beim Fixieren unsichtbar wird. R. Simon[1] hat die Verhältnisse der Fixation mit dunkeladaptiertem Auge untersucht, indem er durch genaue Ortsbestimmung des blinden Fleckes feststellte, welchen Punkt der Netzhaut ein dunkeladaptiertes Auge einstellt, wenn ihm die Aufgabe gesetzt wird, einen Lichtpunkt anzusehen, dessen Lichtintensität unter der fovealen Schwelle liegt. Simon bestätigte zunächst die von Christine Ladd-Franklin[2] gefundene Erscheinung, daß beim Fixieren lichtschwacher und zwar foveal-unterschwelliger Lichtpunkte die einzelnen Beobachter ihre Sehachse verschieden einstellen. Bei Simon selbst lag die bevorzugte Stelle im rechten Auge oberhalb und temporal von der Fovea, im linken Auge gerade oberhalb derselben.

Es ist bemerkenswert, daß auch bei ein und derselben Person diese bevorzugte Stelle sich unter bestimmten Umständen ändert. Ein Lichtpunkt nämlich, dessen Lichtintensität nahe an der fovealen Schwelle liegt, wird bei der Tendenz zur Fixation auf einer Netzhautstelle abgebildet, die der Fovea sehr nahe steht; je schwächer das Licht ist, ein desto mehr exzentrischer Netzhautteil wird zu seiner Betrachtung verwendet. Im gleichen Sinn wie die objektive Intensitätsänderung des Reizlichtes wirkt die subjektive Änderung der Helligkeit des Punkts, die durch fortschreitende Dunkeladaptation bewirkt wird. So fand Simon, daß er bei einer bestimmten foveal unterschwelligen Intensität des Lichtpunkts nach 10 Minuten dauernder Dunkeladaptation ungefähr $2^0$ abseits von der Fovea fixierte, nach weiteren 10 Minuten ungefähr $1^1/_2{}^0$, am Ende der ersten Stunde nur noch etwa $1^0$. Es ist also für jedes Auge wohl die Richtung festgelegt, in welcher das Auge bei der Fixationstendenz abweicht, wenn der Lichtreiz unter den fovealen Schwellenwert sinkt, nicht aber der Abstand des zur Fixation benutzten Punktes von der Foveamitte. In welcher Richtung von der Fovea aus der zur Fixation schwacher Lichter gewählte Netzhautpunkt liegt, dürfte im wesentlichen von muskulären und dioptrischen Verhältnissen abhängen, weniger davon, daß bestimmte Teile der Foveaumgebung etwa durch besondere Empfindlichkeit hervorragten und darum zur Fixation bevorzugt würden.

Von der Einstellung eines außerhalb der Fovea gelegenen, also ungewöhnlichen Punktes zur Fixation hat man im allgemeinen keine Ahnung. Darum sind im Anfang manche Beobachter skeptisch, wenn man ihnen die Hemeralopie der Fovea demonstrieren will; sie sind überzeugt, das lichtschwache Objekt ebenso zu fixieren, wie ein lichtstarkes, während sie die Gesichtslinie in Wirklichkeit an dem ersteren vorbeirichten und es sich nur hierdurch sichtbar machen. Vielen gelingt der Versuch besser, wenn sie zuerst in beliebiger anderer Richtung blicken und dann plötzlich den Blick auf den zu beobachtenden lichtschwachen Fleck richten; dieser verschwindet dann sofort für einige Zeit, bis durch kleine Blickbewegungen wieder unwillkürlich das Bild auf einen neben der Fovea gelegenen empfindlicheren Teil der Netzhaut verschoben wird. Am anschaulichsten ist der folgende Versuch: Man befestigt auf der geschwärzten Außenwand eines Kastens, der eine kleine elektrische Glühlampe enthält, eine runde weiße Papierscheibe von etwa 5 bis 6 cm Durchmesser; in diese ist im Zentrum ein kleines Loch gestochen, das mit rotem Papier hinterlegt und von der Glühlampe im Innern des sonst lichtdichten Kastens durch-

[1] R. Simon, Über Fixation im Dämmerungssehen. Zeitschr. f. Psych. u. Physiol. d. Sinnesorg. **36**, 186.

[2] Vgl. A. König, Ges. Abhand. S. 353.

leuchtet wird. Den weißen Papierkreis beleuchtet von vornher, von der gleichen Seite, auf welcher der Beobachter steht, eine kleine regulierbare Lampe (Gasflämmchen oder elektrische Glühlampe in einer Laterne mit Milchglas und Irisblende). Während nun der vorher dunkeladaptierte Beobachter das rote Pünktchen fixiert, reguliert er die Beleuchtung der weißen Scheibe, in einem Abstand von etwa 3 m stehend, so, daß die weiße Scheibe für ihn unsichtbar wird. Eine kleine Blickschwankung, die ihr Bild außerhalb der Fovea fallen läßt, macht die Scheibe sofort sichtbar, zunächst dunkelgrau, bei größeren Exzentrizitäten leuchtend weiß.

Wer sich mit diesem Fixierpunkt etwas auf den Versuch eingeübt hat, stellt ihn nachher in der Regel auch mit demselben Erfolg an, wenn der rote Punkt gelöscht ist. Es bedarf also nur der Einübung, um den Blick im dunklen Zimmer auf ein lichtschwaches Objekt richten zu lernen, das beim Fixieren verschwindet. Es erschien mir nicht überflüssig, diesen Versuch etwas ausführlicher zu besprechen, weil ich selbst von guten Beobachtern die Meinung vertreten hörte, das zentrale Skotom existiere entweder überhaupt nicht, oder es liege nur eine geringfügige Differenz in der Empfindlichkeit zwischen der Fovea und der übrigen Netzhaut vor. Die letztbeschriebene Versuchsanordnung bekehrte diese Zweifler stets.

### 4. Die Zunahme der Lichtempfindlichkeit in der Fovea centralis bei Lichtabschluß.

Die Fovea, obwohl hemeralopisch im Vergleich zur Netzhautperipherie, entbehrt doch nicht gänzlich einer Adaptationsfähigkeit. Allerdings ist diese sehr viel geringer als in der übrigen Netzhaut. Eine Messung der fovealen Adaptationsbreite ist mit Schwierigkeiten verknüpft, wenigstens in den späteren Stadien, wo die Peripherie die Fovea im Empfindlichkeitsanstieg überholt und deshalb das foveale Fixieren des zur Messung dienenden Reizlichtes nur bei großer Übung gelingt. Leichter sind die Bestimmungen im ersten Stadium der Dunkeladaptation, nach vorausgehender sehr guter Helladaptation. Die Fovea ist dann zunächst noch für ein paar Minuten die empfindlichste Stelle der Netzhaut und hält daher die Fixation leicht fest. Ein die Versuche erschwerender Umstand ist freilich der, daß man, wie schon oben erwähnt, in diesem Stadium voller Helladaptation ein Objekt, dessen Gesichtswinkel nicht größer als der foveale Gesichtswinkel ist und dessen Helligkeit nahe der fovealen Schwelle liegt, nur schwierig und gewissermaßen zufällig findet. Jeder Beobachter befindet sich in diesem Falle in ähnlicher Lage, wie ein Patient, dessen Gesichtsfeld infolge der sog. Retinitis pigmentosa auf den fovealen Bezirk eingeschränkt ist, und der infolgedessen immer wie durch ein enges, vor das Auge gesetztes Rohr sieht („röhrenförmiges Gesichtsfeld"). Schaefer und ich[1] verfuhren daher bei unseren Versuchen, die foveale Adaptation zu messen, so, daß wir dem zu betrachtenden Objekt zuerst eine deutlich überschwellige Helligkeit erteilten, wodurch der ins Dunkelzimmer eintretende Beobachter das Objekt leicht mit dem Blick finden konnte. Dann wurde von einem Gehilfen das Feld schnell verdunkelt, bis es an der Grenze der Wahrnehmbarkeit war. Wir fanden in der ersten Minute einen Anstieg der Empfindlichkeit etwa auf den fünffachen Wert. Diese Bestimmungen sind aber mit einiger Unsicherheit

[1] Zeitschr. f. Psychol. 34, 1904. S. 271.

behaftet. Recht sicher dagegen läßt sich der Zuwachs an Empfindlichkeit messen, der nach Schluß der ersten Minute des Dunkelaufenthalts noch zu finden ist. Diese Zunahme besteht ungefähr in einer Vervierfachung und erstreckt sich zeitlich über etwa 5 bis 8 Minuten. Im ganzen würde also vom ersten Anfang des Lichtabschlusses an die Empfindlichkeit der Fovea auf den 20fachen Betrag steigen, jedenfalls nicht auf nennenswert höhere Beträge. Nach der zehnten Minute habe ich eine Zunahme der fovealen Empfindlichkeit nicht wahrgenommen.

Es ist wichtig festzustellen, daß die foveale Adaptation für Lichter verschiedener Farbe oder Wellenlänge in genau gleicher Weise und gleicher Geschwindigkeit vor sich geht, so daß Lichter, die für das helladaptierte Auge foveal gleich hell aussehen, dies auch für die beliebig lang dunkel adaptierte Fovea tun. Das sog. Purkinjesche Phänomen, das wir später zu betrachten haben werden, existiert also im rein fovealen Sehen nicht.

Zu betonen ist ferner, daß man, um überhaupt eine Empfindlichkeitszunahme der Fovea zu konstatieren, von sehr starker Helladaptation (Blick gegen den hellen Himmel) ausgehen muß. Tritt man aus einem Zimmer von gewöhnlicher Tageshelligkeit in ein Dunkelzimmer, so ist von der beschriebenen, gut meßbaren Adaptation nichts zu merken. Nur in den ersten Sekunden steigt wahrscheinlich die Empfindlichkeit etwas an.

Tschermak[1] hat angegeben, man fände auch in der Fovea die Erscheinungen der Dunkeladaptation, speziell auch das mit dieser zusammenhängende Purkinjesche Phänomen (s. u. S. 302), wenn man den Lichtabschluß nur lange genug durchführe. Tschermak nimmt also eine weit langsamere Adaptation in der Fovea als in der Peripherie an. Dieser abweichende Befund Tschermaks und einiger anderer Autoren beruht auf der Verwendung von Beobachtungsobjekten von größerem Gesichtswinkel, als er dem stäbchenfreien Fovealbezirk entspricht. In der unmittelbaren Umgebung der Fovea, wo sich nur ganz vereinzelte Stäbchen finden (über die Bedeutung dieses Umstandes s. u. S. 291), ist in der Tat die adaptative Empfindlichkeitssteigerung im Dunkeln so geringfügig, daß sie erst nach mehrstündigem Lichtabschluß sicher nachweisbar wird. Das ist aber natürlich ganz etwas anderes als die in den ersten Minuten des Dunkelaufenthalts sich abspielende Empfindlichkeitszunahme, die der Fovea mit der ganzen übrigen Netzhaut gemeinsam ist.

## 5. Die Beziehungen zwischen Lichtempfindlichkeit und Größe des gereizten Netzhautbezirks.

Aubert[2] fand, daß er bei seinen Versuchen im Dunkelzimmer große Flächen schon bei geringerer Beleuchtung sehen konnte, als kleine ebenso stark beleuchtete Objekte. In der Folge hat sich dann eine ganze Anzahl von Forschern mit dieser Tatsache beschäftigt und gesetzmäßige Beziehungen zwischen Lichtempfindlichkeit und Flächengröße des Reizobjekts aufzufinden gesucht; ich nenne von älteren Autoren Treitel[3], Riccò[4] und Charpentier.[5]

[1] A. Tschermak, Pflügers Arch. f. d. ges. Physiol. **70**, 1898. S. 297.

[2] H. Aubert, Physiologie der Netzhaut. Breslau 1865.

[3] Treitel, Über das Verhalten der normalen Adaptation. v. Graefes Arch. f. Ophthalmologie. 1887.

[4] Riccò, *Relazione fra il minimo angolo visuale e l'intensità luminosa. Annali d'Ottalmol.* VI.

[5] Charpentier, *Compt. rend. Acad. Scienc.* XCI, 995. 1880 und *Arch. d'Opht.* **2**, 487. 1882.

In neuester Zeit haben dann Piper[1], Loeser[2], Henius[3] und Fujita[4] in meinem Laboratorium diese Frage von verschiedenen Gesichtspunkten aus bearbeitet.

Die Beziehungen zwischen Lichtempfindlichkeit und Flächengröße sind im hell- und dunkeladaptierten Zustand verschieden, sie sind ferner auch in der Fovea und Netzhautperipherie verschieden. Für das rein foveale Sehen gilt der von Riccò aufgestellte und von Loeser bestätigte Satz, daß das Produkt von Flächengröße des Netzhautbildes und Lichtintensität bei einem Schwellenreiz eine konstante Größe darstellt, oder mit anderen Worten, daß die Empfindlichkeit proportional der Flächengröße des Bildes ist. Für ein kreisförmiges leuchtendes Feld läßt sich der Satz auch so formulieren: Das Produkt aus dem Gesichtswinkel des Feldes und der Quadratwurzel der Schwellenintensität ist konstant. Die wenigstens annähernde Gültigkeit dieses Gesetzes erhellt beispielsweise aus folgender Versuchsreihe von Loeser.

Tabelle V.

| Abstand zwischen Beobachter und Objekt $E$ | Durchmesser des Objekts $D$ | $\sqrt{\text{Lichtintensität}}$, ausgedrückt in dem Durchmesser einer Blende $J$ | Gesichtswinkel $\frac{D}{E}$ | Produkt $\frac{D}{E} \cdot J$ |
|---|---|---|---|---|
| 8 m | 20 mm | 0,87 | 2,5 | 2,18 |
| | 14 „ | 1,27 | 1,75 | 2,22 |
| | 8,5 „ | 2,4 | 1,06 | 2,5 |
| | 5 „ | 3,45 | 0,63 | 2,26 |

Anders liegen nun die Verhältnisse für die Netzhautperipherie. Ich gebe im folgenden eine Tabelle aus Pipers Arbeit wieder, die für Dunkeladaptationszustand gilt.

Tabelle VI.

| Flächengröße | $\sqrt{\text{Flächengröße}}$ bzw. Winkelgröße | Schwellenwert | rel. Reizwert | Produkt aus Winkelgröße und Schwellenwert |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 10,0 | 1 | 10,0 |
| 10 | 3,15 | 2,94 | 3,4 | 9,3 |
| 25 | 5 | 1,96 | 5,1 | 9,8 |
| 100 | 10 | 1,02 | 9,8 | 10,2 |

Man erkennt sogleich, daß von einer Proportionalität von Flächengröße und Reizwert nicht die Rede sein kann und natürlich ebensowenig das Produkt aus Flächengröße und Schwellenwert konstant ist. Wohl aber besteht eine fast völlige Proportionalität zwischen den Reizwerten und der Wurzel aus der Flächengröße (bzw. dem Sehwinkel des Netzhautbildes, wenn es sich um geometrisch ähnliche Objekte handelt). Die Schwellenwerte sind in dieser Tabelle in einer solchen Einheit angegeben, daß die Beziehung zwischen Reizwert und Sehwinkelgröße in die Augen fällt.

[1] H. Piper, Über die Abhängigkeit des Reizwertes leuchtender Objekte von ihrer Flächen- bzw. Winkelgröße. Zeitschr. f. Psych. u. Physiol. d. Sinnesorg. **32**, 98.

[2] L. Loeser, Über die Beziehungen zwischen Flächengröße und Reizwert leuchtender Objekte bei fovealer Beobachtung. Beiträge z. Augenheilk. Festschrift für J. Hirschberg 1905.

[3] K. Henius, Die Abhängigkeit der Lichtempfindlichkeit von der Flächengröße usw. Zeitschr. f. Sinnesphysiol. **43**, 99. 1909.

[4] T. Fujita, Versuche über die Lichtempfindlichkeit der Netzhautperipherie unter verschiedenen Umständen. Ebenda. **43**, 243. 1909.

Piper hat gezeigt, daß der Reizwert einer leuchtenden Fläche, am Schwellenwert gemessen, innerhalb weiter Grenzen unabhängig ist von der Gestalt der Fläche. Auf Grund seiner Beobachtungen formulierte Piper den Satz: Für die dunkeladaptierte Netzhautperipherie ist der Reizwert einer lichtaussendenden Fläche proportional der Quadratwurzel der Flächengröße des Netzhautbildes, oder mit anderen Worten: Das Produkt des Lichtschwellenwertes mit der Wurzel aus der Flächengröße des Netzhautbildes stellt eine konstante Größe dar.

Diese Regel gilt, wie die neuesten Untersuchungen von Henius und Fujita gezeigt haben, streng nur für die Bedingungen, die Piper bei seinen Versuchen eingehalten hatte, nämlich für gemischtes weißes Licht und Objektgrößen bis zu einem Gesichtswinkel von 10°. Bei noch größeren Flächen ergaben sich zunehmende Abweichungen, wie die folgende Tabelle VII (nach Henius) zeigt. Die Reizwerte sind wie in der Tabelle nach Piper so berechnet, daß der Reizwert bei einem Objekt von 1° Durchmesser = 1 gesetzt ist. Die zur Beobachtung verwendete Netzhautstelle lag 10° oberhalb der Fovea.

Tabelle VII.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|
| Flächengröße | $\sqrt{\text{Flächengröße}}$ oder Durchmesser des runden Objekts in Graden | Schwellenwert' | Produkt von 2 und 3 | Reizwert (Empfindlichkeit) |
| 1 | 1 | 454 | 454 | 1,0 |
| 4 | 2 | 260 | 520 | 1,7 |
| 9 | 3 | 127 | 381 | 3,5 |
| 16 | 4 | 94 | 376 | 4,8 |
| 25 | 5 | 79 | 395 | 5,7 |
| 49 | 7 | 60 | 420 | 7,5 |
| 100 | 10 | 46 | 460 | 9,8 |
| 225 | 15 | 35 | 525 | 13,0 |
| 400 | 20 | 26 | 520 | 17,5 |
| 625 | 25 | 25 | 625 | 18,1 |
| 900 | 30 | 21 | 630 | 21,6 |

Von 10° an steigt also die Empfindlichkeit, ausgedrückt durch den Reizwert, merklich langsamer mit steigender Winkelgröße an. Noch viel geringer ist dieser Anstieg, und zwar auch schon bei kleinen Winkeln, wenn das Reizlicht rot ist. Auch bei Feldgrößen unter 1° werden die Abweichungen von der Piperschen Regel beträchtlich, wie Fujita festgestellt hat.

Wesentlich anders liegen nun aber die Verhältnisse, wenn es sich um das Sehen mit helladaptiertem Auge handelt. Für leuchtende Flächen, deren Größe den fovealen Gesichtswinkel von $1^1/_2{}^\circ$ bis 2° merklich überschreitet, ist überhaupt keine deutliche Abhängigkeit der Reizschwelle von der Winkelgröße zu konstatieren. Umstehende Tabelle VIII nach Fujita zeigt das deutlich.

Erst die beiden letzten Werte weisen eine kleine Steigerung gegen die vorhergehenden auf, doch ist es höchst wahrscheinlich, daß dafür eine nicht zu vermeidende Einmischung einer geringen Dunkeladaptation verantwortlich zu machen ist. Das Heruntergehen der Empfindlichkeit bei Winkeln unterhalb 3° kann aber nicht wohl auf Fehlerquellen zurückgeführt werden, sondern wir haben hier eine Abhängigkeit vor uns, die noch deutlicher in Versuchen von Fujita zum Ausdruck kommt, in denen die Reizwerte bei Winkelgrößen von

weniger als 1° (bei 10° Exzentrizität, weißem Licht und Helladaptation) verglichen wurden.

Tabelle VIII. Weißes Reizlicht, 30° Exzentrizität, Helladaptation.

| Gesichtswinkel | Empfindlichkeit (als reziproke Werte der Reizschwellenwerte) |
|---|---|
| 1° | 25 |
| 2° | 40 |
| 3° | 50 |
| 5° | 50 |
| 10° | 50 |
| 15° | 50 |
| 20° | 53 |
| 30° | 53 |

Tabelle IX.

| Gesichtswinkel des Objekts in Graden | Flächengröße des Objekts in relativen Werten | Schwellenwerte | relative Empfindlichkeitswerte |
|---|---|---|---|
| 1,0° | 1,00 | 2300 | 1,00 |
| 0,5° | 0,25 | 4500 | 0,51 |
| 0,25° | 0,06 | 10000 | 0,23 |

Das Abhängigkeitsverhältnis des Reizwertes dieser kleinen Flächen von deren Durchmesser zeigt sich hier als sehr nahe der Piperschen Regel für große Flächen und Dunkeladaptation entsprechend. Diese Messungen sind ihrer Schwierigkeit wegen nur als relativ sicher zu betrachten. Sicher aber ist, daß bei kleinen Objekten von etwa 2° Gesichtswinkel abwärts der Schwellenreizwert der leuchtenden Fläche mit dem Gesichtswinkel sinkt, und zwar nicht so schnell, wie es der Ricco'schen Regel entsprechen würde, also auch nicht so, wie es in der Fovea der Fall ist.

Infolge der Tatsache, daß die Abhängigkeit der Schwellenempfindlichkeit von der Objektgröße im Zustande der Helladaptation und der Dunkeladaptation deutlich verschieden ist, zumal bei mittelgroßen Flächen zwischen 5° und 15° Gesichtswinkel, muß die Adaptationsbreite bei Verwendung verschieden großer Leuchtflächen verschieden groß gefunden werden, und zwar zunehmend mit der Flächengröße. Dies hatte in der Tat Treitel schon angegeben, und Piper konnte durch systematische Untersuchung des Adaptationsganges mit verschieden großem Objekt beträchtliche Unterschiede in dem Anstieg der Adaptationskurven erhalten.

## 6. Die binokulare Reizsummation.

Bei Bestimmung von Lichtsinnesschwellen ist es nicht gleichgültig, ob man mit einem oder beiden Augen beobachtet, vielmehr findet man im Zustand der Dunkeladaptation die Reizschwelle im binokularen Sehen merklich niedriger als im Monokularsehen, nach Bestimmungen von Piper[1] etwa halb so hoch. Diese Beobachtung ist von zahlreichen anderen Beobachtern in meinem Laboratorium bestätigt worden, ferner auch von W. Lohmann[2], der allerdings beim Vergleich

[1] H. Piper, Über das Helligkeitsverhältnis monokular und binokular ausgelöster Lichtempfindungen. Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **32**, 161.

[2] W. Lohmann, Untersuchungen über Adaptation und ihre Bedeutung für Erkrankungen des Augenhintergrundes. v. Graefes Arch. f. Ophthal. **65**. 1907.

zahlreicher Versuchspersonen fand, daß die Erhöhung der Empfindlichkeit durch die Beteiligung des zweiten Auges nicht bei allen Personen im gleichen Maße auftritt (am merklichsten bei Schielenden). So mag es sich erklären, daß einzelne Beobachter die Schwellen monokular und binokular fast gleich fanden (z. B. Wölfflin[1]). Ich finde die Tatsache der binokularen Reizaddition bei mir und vielen anderen Beobachtern sehr leicht nachweisbar.

Bekanntlich gilt für das Sehen im hellen Raum die auch von Helmholtz bestätigte Angabe Fechners[2], daß eine helle Fläche, mit beiden Augen betrachtet, nicht heller aussieht, als im monokularen Sehen. Höchstens legt sich ein leichter Schatten über die Fläche, wenn das eine Auge geschlossen wird.

Bei Ausführung dieses Versuchs ist zu bedenken, daß in dem verschlossenen oder mit der Hand bedeckten Auge sich sehr schnell ein gewisser Grad von Dunkeladaptation einstellt, wenn der Ausgangszustand bei der Beobachtung der mittlere Adaptationsgrad ist, den man im Zimmer anzunehmen pflegt. Wird nun das Auge aufgedeckt, so kommt zu dem freigebliebenen Auge nicht ein zweites Auge gleicher Empfindlichkeit hinzu, sondern ein Auge, das im Moment des Aufdeckens erhöhte Empfindlichkeit besitzt. Bei sehr guter Helladaptation und sehr kurzer Verdeckung des einen Auges merkt man in der Tat meistens nichts von einem Unterschied der monokular und binokular ausgelösten Helligkeit.

Daß tatsächlich ein Unterschied zwischen dem helladaptierten und dem dunkeladaptierten Augenpaar hinsichtlich der binokularen Reizaddition besteht, hat Piper erwiesen, indem er während des ganzen Versuchs der Dunkeladaptation abwechselnd die monokularen und binokularen Schwellen bestimmte. Die Tabelle X gibt das Resultat eines solchen Versuchs, bei dem ich als Beobachter fungierte. Fig. 66 (a. f. S.) stellt das Ergebnis graphisch dar. Der Versuch wurde noch vor der Konstruktion des Adaptometers angestellt, die absoluten Empfindlichkeitswerte sind also mit den an anderen Stellen angegebenen nicht direkt vergleichbar, sondern in einer willkürlichen Einheit ausgedrückt.

Tabelle X.

| Binokular | | Rechtes Auge | | Linkes Auge | |
|---|---|---|---|---|---|
| Zeit Min. | Empfindlichkeit | Zeit Min. | Empfindlichkeit | Zeit Min. | Empfindlichkeit |
| 0 | 86 | $^1/_2$ | 111 | 1 | 111 |
| $3^1/_2$ | 272 | $4^1/_2$ | 498 | 5 | 498 |
| $8^1/_2$ | 2724 | $9^1/_2$ | 2914 | $10^1/_2$ | 3419 |
| $14^1/_2$ | 11815 | $15^1/_2$ | 13521 | 16 | 14516 |
| $20^1/_2$ | 41649 | $21^1/_2$ | 27778 | $22^1/_2$ | 22957 |
| $27^1/_2$ | 65746 | $28^1/_2$ | 38447 | 30 | 33058 |
| 37 | 81632 | $39^1/_2$ | 40000 | $40^1/_2$ | 36982 |
| $52^1/_2$ | 97656 | 56 | 40000 | 57 | 41649 |
| 59 | 97656 | | | | |

Erst nach der 14. Minute trennen sich die Kurven für monokulares und binokulares Sehen deutlich. Messmer (l. c.) hat ganz entsprechende Resultate bei der Untersuchung verschiedener Soldaten erhalten, die ihm als normale Vergleichspersonen bei der Untersuchung hemeralopischer Patienten dienten. Wenn

[1] E. Wölfflin, Der Einfluß des Lebensalters auf den Lichtsinn bei dunkeladaptiertem Auge. Ebenda 61. 1905.

[2] Fechner, Über einige Verhältnisse des binokularen Sehens. Abhandl. der sächs. Gesellsch. d. Wissensch. 7. 1860. S. 423. S. auch Bd. III S. 424.

ein Auge hell-, das andere dunkeladaptiert wird, so verhält sich das hell-adaptierte, wenn es bei der Beobachtung mit benützt wird, genau so, als ob es geschlossen wäre, d. h. der Schwellenwert wird dann im monokularen und binokularen Sehen gleich groß gefunden. Piper sieht hierin mit Recht einen weiteren Beweis für die Unabhängigkeit des Adaptationsvorgangs in den beiden Augen. Derselbe Forscher konnte im weiteren Verlauf seiner Untersuchungen zeigen, daß auch bei merklich überschwelligen Reizen eine binokulare Reizaddition eintritt, sofern die Augen beide dunkeladaptiert sind. Er wählte eine

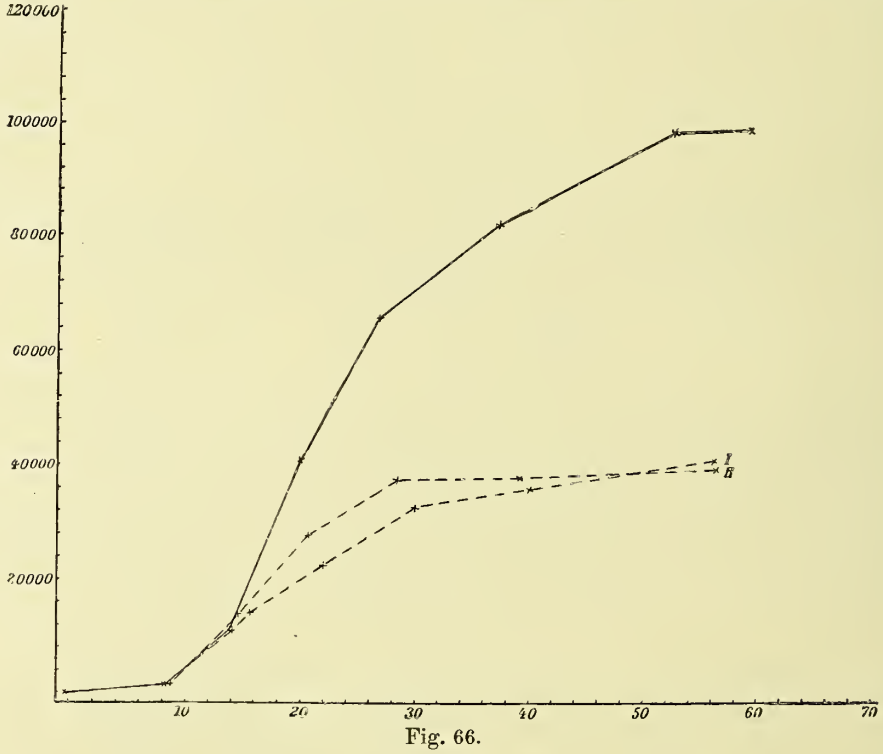



Fig. 66.

Versuchsanordnung, bei der von zwei weißen Flächen, für welche die Beleuchtungsintensität beliebig abstufbar war, die eine nur dem einen Auge, die andere dagegen beiden Augen gleichzeitig sichtbar war. So war ein Vergleich des monokularen Sehens mit dem binokularen möglich und ergab, daß, um gleiche scheinbare Helligkeit für beide Beobachtungsweisen zu erzielen, die Beleuchtungsintensität für das nur monokular sichtbare Feld im Mittel den 1,6 bis 1,7fachen Betrag derjenigen des anderen Feldes haben mußte, bei sehr geringen Intensitäten in der Nähe der Schwelle sogar nahezu den doppelten Betrag.

Setzen wir diese Ergebnisse der Binokularbeobachtung mit denjenigen in Beziehung, die bei der Bestimmung von Schwellenwerten auf verschieden großen Netzhautflächen erhalten wurden, so stellt sich die bemerkenswerte Analogie heraus, daß bei voller Helladaptation des Auges die Reizwerte der Lichtmengen, welche auf die verschiedenen Punkte der Netzhaut auffallen, nicht addiert werden, sobald die gereizte Fläche eine gewisse Größe (von einigen Graden Gesichtswinkel) überschreitet, und daß auch das helladaptierte Augenpaar die Reizwerte der in beiden Augen einwirkenden Lichtmengen nicht addiert, während beim

Dunkeladaptationszustand beide Additionen deutlich und gesetzmäßig auftreten. Auf die möglichen Erklärungsversuche für diese Tatsache wird erst an anderer Stelle einzugehen sein.

### 7. Kleinste zur Erregung ausreichende Energiemenge.

Die kleinste Energiemenge, die zur Erregung des Sehorganes erforderlich ist, haben in neuester Zeit verschiedene Forscher bestimmt und in absolutem Maß angegeben. So hat Wien[1] für die Energie, die dem Auge von den lichtschwächsten noch sichtbaren Sternen in der Sekunde zugeführt wird, den Wert von $4 \cdot 10^{-8}$ Erg berechnet. Systematische Versuche hat v. Kries[2] ausführen lassen, unter Berücksichtigung der Qualität des Reizlichtes und des Ortes der Reizung auf der Netzhaut. Die durch Dr. Eyster ausgeführten Messungen erfolgten an der empfindlichsten Stelle der Netzhaut und mit demjenigen spektralen Licht, bei welchem das Verhältnis der Sichtbarkeit zur Energie (Langleys Messungen zugrunde gelegt) seinen höchsten Wert erreicht, nämlich einem blaugrünen von der Wellenlänge 507 $\mu\mu$. Nach bester Dunkeladaptation und unter den günstigsten räumlichen und zeitlichen Verhältnissen für die Ausnützung der Energie fand Eyster Werte von 1,3 bis $2{,}6 \cdot 10^{-10}$ Erg. Für dauernd sichtbares Licht stellte sich der Wert auf $5{,}6 \cdot 10^{-10}$ Erg pro Sec.. Dr. Boswell[3], der analoge Bestimmungen für das rein foveale Sehen ausführte, wählte als Reizlicht das längstwellige Licht aus dem Spektralbezirk, in dem nach den Berechnungen von König das Verhältnis von Helligkeit und Energiewert zu ziemlich gleichmäßigen Werten führt, nämlich das Natriumlicht (589 $\mu\mu$), weil dieses Licht aus später zu erwähnenden Gründen die foveale Fixation leichter gestattet, als kürzerwellige Lichter. Boswell beobachtete im Zustande geringer Dunkeladaptation, also wohl unter Bedingungen, unter denen die foveale Empfindlichkeit schon ihren Maximalwert erreicht hat, was nach den oben mitgeteilten Bestimmungen von Schäfer und mir selbst nach vorausgegangener stärkster Helladaptation schon bei 10 Minuten Dunkeladaptation der Fall ist. Der eben noch wirksame Energiewert stellte sich im Mittel zahlreicher Messungen zu $31{,}6 \cdot 10^{-10}$ Erg heraus. Dieser Wert gilt für kurze Exposition des Reizlichtes, während bei Dauerexposition die 16 bis 20fache Energiemenge pro Sec. erforderlich ist.

Es ist in hohem Grade bemerkenswert, daß die zur Reizung der Netzhautperipherie nötigen Energiemengen nur etwa den 15fachen Betrag der zur Erregung der Fovea erforderlichen erreichen, während man nach den bedeutenden Unterschieden zwischen Zentrum und Peripherie bei der Wahrnehmung schwächster Lichter weit höhere Differenzen erwarten könnte. Es muß aber berücksichtigt werden, daß die Überlegenheit der Peripherie sich besonders bei der Beobachtung größerer Objekte und langer Expositionszeit geltend macht. Vergleicht man die mitgeteilten Werte für Dauerexposition des Reizlichtes bei Eyster und Boswell, so zeigt sich, daß die Peripherie unter diesen Umständen der Fovea schon um mehr als das 100fache überlegen ist.

[1] Wien, Über die Messung von Tonstärken. Diss. Berlin 1888.

[2] J. v. Kries, Über die zur Erregung des Sehorgans erforderlichen Energiemengen. Nach Beobachtungen von Herrn Dr. Eyster mitgeteilt. Zeitschr. f. Sinnesphysiol. 41, 373. 1906 (u. Ges. Abhandl. z. Physiol. d. Gesichtsempfindungen. 3, 4).

[3] F. P. Boswell, Über die zur Erregung des Schorgans in der Fovea erforderlichen Energiemengen. Ebenda. 42, 299. 1907.

Bei einfacher Schwellenbestimmung an Objekten von 1° Durchmesser, frei zu wählender Blickrichtung und beliebig langer Beobachtung übertrifft, wie wir oben sahen, im dunkeladaptierten Auge die Peripherie die Fovea um etwa das 1000fache. Berücksichtigt man ferner, daß bei Schwellenbestimmungen am Adaptometer, mit frei beweglichem Auge, die Beobachtungsbedingungen günstiger sind, als bei Messungen an einer Spektralvorrichtung mit Okularspalt, und daß dieser Umstand sich bei exzentrischer Beobachtung mehr als bei fovealer Fixation geltend machen wird, so erscheint der verhältnismäßig geringe Unterschied für die Erregung von Fovea und Peripherie nach dem Befund im v. Kriesschen Laboratorium nicht mehr überraschend. Noch verständlicher wird er durch die vergleichende Untersuchung Boswells über die Energiewerte, die bei Verwendung anderen als gelben Reizlichtes gefunden werden. Hierbei ergibt sich der Reizwert des grünen Lichtes mehr als doppelt so hoch wie der des Natriumlichtes.

## B. Duplizitätstheorie und Dämmerungssehen.

### 1. Die Duplizitätstheorie.

Abgesehen von den quantitativen Veränderungen, die sich aus dem Wechsel in der Empfindlichkeit ergeben, sind mit der Adaption noch eine Reihe qualitativer Änderungen des Sehens verknüpft, die sich besonders in Bezug auf die Farbenverhältnisse, daneben auch in einigen anderen Hinsichten (zeitliche Verhältnisse u. dgl.) bemerkbar machen. Es sind zum Teil zwar gewisse bereits im vorigen Abschnitt erwähnte, ganz besonders aber diese Erscheinungen, die in neuerer Zeit mehr und mehr eine ganz bestimmte Anschauung von der Einrichtung und Funktion des Sehorgans befestigt haben. Und da sich die Darstellung der Beobachtungstatsachen durch die Heranziehung dieser Annahme in hohem Grade vereinfacht, so will ich die Grundgedanken derselben hier sogleich darlegen.

Helmholtz hatte in der ersten Auflage der „Physiologischen Optik“ es als unwahrscheinlich bezeichnet, daß außer den Zapfen auch die Stäbchen lichtempfindliche Elemente seien (s. o. S. 29). In der zweiten Auflage schließt er sich der Annahme von H. Müller und Koelliker an, nach welchen auch die Stäbchen Lichtempfindung vermitteln (s. o. S. 28), meint jedoch, sie müssen bei der Lokalisation der Empfindungen eine andere Rolle spielen als die Zapfen. Unerwähnt bleibt dabei die Hypothese, die Max Schultze[1] im Jahre 1866 aufgestellt hatte und deren Grundgedanke seither von einer größeren Zahl von Autoren aufgenommen wurden[2]. Nach dieser Hypothese vermitteln die Stäbchen nur einfache Lichtempfindung ohne Farbenunterscheidung, die Zapfen sind die Organe der Farbenperzeption. Die wesentlichsten Stützen der Schultzeschen Anschauung lagen in der Abnahme des Farbensinns nach der Netzhautperipherie hin, die mit dem Überwiegen der Stäbchen über die Zapfen in den peripheren Teilen in Beziehung gesetzt wurde, ferner in vergleichend anatomischen Betrachtungen. Bei Tieren, die sich entweder nur in dunklen Räumen (Höhlen u. dgl.) aufhalten oder nur bei schwacher Beleuchtung frei und lebhaft bewegen, fand Schultze die Stäbchen weit reichlicher ausgebildet als bei Tieren, die das

[1] Arch. f. mikroskop. Anat. **2**, 1866. S. 247—261.

[2] Vgl. betreffs der hier nicht aufgeführten Literatur das Referat von Tschermak in den „Ergebnissen der Physiologie“ I, 2. 1902.

helle Licht nicht fliehen, ja bei manchen Dämmerungstieren sah er ausschließlich Stäbchen und keine Zapfen, andererseits bei Tieren, die viel im hellen Sonnenlicht leben, wie Eidechsen und Schlangen, nur Zapfen und keine Stäbchen.

Die Begründung, die Max Schultze seiner Theorie gab, können wir heutzutage nicht ganz stichhaltig nennen. Die periphere Farbenblindheit erklärt sich zum Teil anders, als Schultze annahm, und auch von seinen vergleichend anatomischen Angaben hat sich wenigstens die nicht bestätigt, daß die Nachttiere nur Stäbchen besitzen. Säugetiere und Vögel ohne Zapfen haben die neueren anatomischen Forschungen nicht finden lassen. Die Tatsache aber bleibt als richtiger Kern in der Hypothese des weitblickenden Anatomen bestehen, daß der Stäbchenapparat im Verhältnis zum Zapfenapparat bei den Nacht- und Dämmerungstieren weit stärker ausgebildet ist, als bei ausgesprochenen Tagtieren. Der Unterschied äußert sich freilich weniger in der Zahl, als in der Länge der Stäbchen und ihrem Gehalt an Sehpurpur.

Eine ungleich festere Grundlage erhielt die Lehre von der funktionellen Verschiedenheit der Stäbchen und Zapfen durch die Forschungen von Parinaud[1] und J. v. Kries[2], die unabhängig voneinander und auf verschiedenen Wegen vorgehend zu einer vollen Bestätigung der Max Schultzeschen Hypothese gelangten und sie zu einer wohl fundierten Theorie ausgestalteten. Wenn wir diese mit v. Kries als „Duplizitätstheorie" bezeichnen, bringen wir damit die Annahme zum Ausdruck, daß der morphologischen Zweiheit von Neuroepithel-Elementen in der Netzhaut auch eine funktionelle Zweiheit entspricht, daß es gewissermaßen zwei Arten des Sehens gibt. Die eine Art ist diejenige, die in Tätigkeit tritt, wenn die Augen helladaptiert sind und von starken Lichtreizen getroffen werden, — das „Tagessehen" nach der v. Kriesschen Nomenklatur; ihm steht gegenüber das „Dämmerungssehen" bei dunkeladaptiertem Auge und schwachem Lichtreiz. Nach der Duplizitätstheorie ist das Organ für das Tagessehen, der „Tagesapparat" oder Hellapparat der Netzhaut durch die Gesamtheit der Zapfen repräsentiert, der „Dämmerungsapparat" oder Dunkelapparat durch die Stäbchen nebst dem in ihren Außengliedern imbibierten Sehpurpur.

Untereinander und mit Max Schultze übereinstimmend nahmen Parinaud und v. Kries an, daß die Stäbchen nur eine Qualität der Lichtempfindung zu vermitteln vermögen, der Dämmerungsapparat also gewissermaßen total farbenblind genannt werden muß, während sie den Tagesapparat als „farbentüchtig", d. h. zur Farbenunterscheidung befähigt betrachten.

Im Sehen mit dem fovealen stäbchenfreien Netzhautbezirk haben wir die Funktion des Tagesapparates rein vor uns. Die Funktion des Dämmerungsapparates läßt sich nicht in so einfacher Weise isolieren. Beim Sehen unter gewöhnlichen Umständen bei nicht zu großer Lichtstärke funktionieren, der theoretischen Annahme zufolge, Zapfen und Stäbchen gleichzeitig, nebeneinander; den Stäbchen wird aber ein viel höheres Maß von Dunkeladaptationsvermögen zugeschrieben, so daß bei geringer Beleuchtungsintensität die Reizstärke wohl noch zur Erregung des Stäbchen- oder Dämmerungsapparates ausreicht, nicht mehr jedoch zur Reizung des Zapfenapparats. So wird also unterhalb einer

[1] Parinaud, *Arch. gén. de méd.* April 1881; *C. R.* Aug. 1881. 286; *C. R.* Nov. 1884; Annal. d'ocul. 1894. **112**, 228; Arch. d'ophth. **16**, 87. 1896.

[2] J. v. Kries, Ber. naturf. Ges. Freiburg IX. 1894. Über die Funktion d. Netzhautstäbchen. Zeitschr. f. Psychol. **9**, 81. 1895; Gräfes Arch. f. Ophth. **42**, 95. 1896.

gewissen Grenze der Beleuchtungsintensität das hierbei etwa noch vorhandene Sehvermögen ausschließlich auf das Funktionieren der Stäbchen zu beziehen sein. Darüber, ob bei großer Lichtintensität sowohl die Stäbchen wie die Zapfen funktionsfähig bleiben und sich also beide Arten des Sehepithels beim Sehen in großer Helligkeit vereinigen, macht die Duplizitätstheorie zunächst keine bestimmte Annahme. Während der Morgen- und Abenddämmerung, sowie überhaupt bei geringer Helligkeit, werden die Funktionen der beiden Apparate in komplizierter Weise ineinander greifen, wie dies in den nachstehenden Abschnitten besprochen werden soll.

Die Begründung für die Duplizitätstheorie ergibt sich in der Hauptsache aus der vergleichenden Betrachtung des Sehens mit der Fovea einerseits und mit der stäbchenhaltigen Peripherie andererseits.

In dem vorausgehenden Zusatzkapitel hatten wir festgestellt S. 278, daß die absolute Empfindlichkeit der Netzhaut in deren Mitte, in der Fovealregion, nicht annähernd so hohe Werte zu erreichen vermag, wie etwa in $10^0$ abseits der Fovea gelegenen Netzhautteilen.

Damit ein weißes Licht aussendendes Objekt von etwa $1^0$ Gesichtswinkelgröße bei direkter Fixation noch eben gesehen werden kann, muß, wie oben erwähnt, die Lichtintensität rund 1000 mal größer sein, als wenn das Auge mit den empfindlichsten Teilen der Netzhautperipherie beobachtet, immer unter der Voraussetzung guter Dunkeladaptation. Bei Helladaptation dagegen ist die Empfindlichkeit in der Fovea etwas größer als in den peripheren Teilen. Die überlegene Empfindlichkeit der dunkeladaptierten Netzhautperipherie erklärt sich am einfachsten durch die Annahme, daß die in der Fovea fehlenden, in der Peripherie aber neben den Zapfen vorhandenen Stäbchen in viel höherem Maße als die Zapfen bei Lichtabschluß an Empfindlichkeit zunehmen, und daß daher mit abnehmender Beleuchtungsintensität, z. B. in der Abenddämmerung, immer mehr die Stäbchen die Rolle der Reizempfänger übernehmen, bis schließlich bei einem gewissen Grade der Verdunkelung die Lichtintensität nicht mehr ausreicht um die der Stäbchen entbehrende zentrale Netzhautpartie überhaupt noch zu erregen. So kommt dann der für das Dämmerungssehen charakteristische Zustand heraus, in welchem in der Mitte des Gesichtsfeldes ein Funktionsausfall, ein „Skotom", vorhanden ist.

### 2. Die Qualität der Lichtempfindung im Dämmerungssehen.

Fragen wir nach weiteren Eigenschaften des Dämmerungssehens, so fällt als besonders bemerkenswert der Mangel aller Farbenunterscheidung auf. Es ist in der Tat nicht schwer, sich davon zu überzeugen, daß man im Zustande des Dämmerungssehens „totalfarbenblind" ist. Diese Beobachtung läßt sich in jedem Zimmer bei Nacht ausführen, wenn man eine passend in ihrer Intensität abstufbare Lichtquelle zur Beleuchtung verwendet, die man bald dunkler bald heller stellt. Sobald Farbenunterscheidungen möglich sind, ist man sicher schon bei einer Beleuchtungsstärke angekommen, die oberhalb des Schwellenwertes der Fovea centralis liegt. Befindet sich z. B. im Dunkelzimmer ein Stück roten Papiers und erkennt man an diesem die rote Farbe bei einer bestimmten Beleuchtungsstärke, so wird man sich vergeblich bemühen, ein Stückchen dieses roten Papiers, das unter dem Winkel von $1^0$ bis $2^0$ erscheint, in dem fovealen Netzhautbezirk „verschwinden" zu lassen, wie man es bei weißem Objekt und hinreichend niedriger Helligkeitsstufe so leicht kann, indem man die Fixation

plötzlich auf das Objekt richtet (s. o. S. 282). Die Intensität liegt über der Schwelle der fovealen Empfindlichkeit.

Auch mit orangefarbigem, braunem und einigermaßen noch mit grünem Papier fällt der Versuch in gleichem Sinne aus. Mit blauen Objekten dagegen wird man bei solchen Versuchen auf Schwierigkeiten stoßen. Viele Beobachter geben, wenn man sie solche Versuche anstellen läßt, an, ein blaues Papier noch deutlich blau zu sehen, wenn die Beleuchtungsintensität der Fläche sicher unter der fovealen Schwelle liegt, wenn also ein passend zugerichtetes kleines Stück des blauen Objektes bei fovealer Fixation verschwindet. Bekannt ist auch, daß der nächtliche aber nicht vollkommen lichtlose Himmel häufig in schönem Dunkelblau erscheint[1], sowie daß eine vom Mond beschienene Landschaft wie von einem bläulichweißen Schimmer übergossen aussehen kann.

Diese Beobachtungen weisen darauf hin, daß die Qualität der Lichtempfindung im Dämmerungssehen nicht immer „farblos", d. h. weiß oder grau ist, sondern wenigstens unter gewissen Umständen bläulich sein kann. Dies steht nicht in Widerspruch mit der Tatsache totaler Farbenblindheit im Dämmerungssehen; denn mit letzterem Ausdruck soll ja nicht die Unfähigkeit, Licht in irgendeiner Farbenqualität zu sehen, behauptet werden, sondern nur die Unmöglichkeit verschiedene Farben als voneinander abweichende Qualitäten zu unterscheiden. Blicken wir durch ein Glas, das nur die Strahlen von einer bestimmten Farbe durchläßt, z. B. ein dunkelrotes Rubinglas, so sind wir praktisch farbenblind, d. h. die durch das Glas gesehenen Dinge erscheinen uns sämtlich in Abstufungen vom hellen Rot bis zum Schwarz. In diesem Falle, beim Sehen durch das rote Glas, ist die Färbung alles Gesehenen so intensiv, daß man keinen Augenblick im Zweifel sein kann, ob man alles farbig oder farblos sieht. Anders wird die Sache schon, wenn wir durch ein schwächer gefärbtes und besonders durch ein blaues Glas sehen. Setzt man sich eine blaue Schutzbrille auf, so erscheint im ersten Augenblick alles Weiße lebhaft blau (— da diese Gläser nicht nur blaue Strahlen durchlassen, sieht man rote und grüne Gegenstände verhältnismäßig wenig verändert, manche fast in ihren natürlichen Farben —). Trägt man eine solche Brille aber einige Stunden lang, so verschwindet das Blau mehr und mehr aus dem Gesichtsfeld und man sieht dann die weißen Gegenstände nicht mehr blau, sondern weiß. Besonders dann ist dies der Fall, wenn die Brille, ähnlich den Schneebrillen, Vorrichtungen zum Schutz gegen seitlich einfallendes Licht hat und dadurch der Vergleich mit nicht blau bestrahlten Gesichtsfeldteilen wegfällt.

Kann hiernach eine nicht sehr gesättigte Blauempfindung in großen Teilen des Gesichtsfeldes schon nach verhältnismäßig kurzer Zeit ihres spezifisch farbigen Charakters verlustig gehen und der Empfindung der Farblosigkeit Platz machen, so wird analoges auch im Dämmerungssehen geschehen können, besonders da hier die Intensität der Lichtreize schwach ist und der Simultan-Vergleich mit andersfarbigen Gesichtsfeldteilen gänzlich fehlt.

Andererseits wird man erwarten dürfen, daß die farbige Qualität des Dämmerungssehens dann besonders deutlich sich bemerkbar machen muß, wenn die Möglichkeit besteht, die Empfindung, die in einem unter den Bedingungen des Dämmerungssehens stehenden Auge ausgelöst wird, zu vergleichen mit der Empfindung die in einem helladaptierten Auge unter den Bedingungen des

[1] Dove, Poggendorffs Ann. **85**, 1851. 397. (S. auch oben S. 192).

Tagessehens entsteht. Derartige Beobachtungen habe ich in folgender Weise ausgeführt. Der Beobachter bringt seinen Kopf vor einen Kasten, welcher auf der ihm zugewandten Seite offen ist. Eine vertikale Scheidewand teilt den Kasten in zwei Hälften, und das rechte Auge blickt nun in die rechte, das linke in die linke Kastenhälfte hinein. Die Hinterwand des Kastens besteht aus Milchglas. Ein Anbau hinter dieser Milchglasplatte trägt die Vorrichtungen zur Abstufung der Beleuchtung für beide Hälften der Milchglasscheibe. Es sind zwei Irisblenden, in welche kleine Stücke von Milchglas eingesetzt sind und in welche außerdem noch farbige Gläser eingelegt werden können. Vor jede der Blendenöffnungen kann eine besondere Lichtquelle gebracht werden und der Beobachter kann durch binokularen Successivvergleich feststellen, ob die beiden Felder im Innern des Kastens helligkeits- und farbengleich sind

Es wird nun für eines der Felder, nehmen wir an, das rechte, die Lichtstärke so gewählt, daß sie zwar unter dem fovealen Schwellenwert bleibt, für ein gut dunkeladaptiertes Auge dagegen möglichst hell erscheint. (Man erreicht diese Grenze am bequemsten, indem man das Feld mit einem schwarzen Papier verdeckt, das ein Loch von der Gesichtswinkelgröße von 3° bis 4° hat. Wenn die hierdurch gesehene freie Milchglasfläche bei direkter Fixation mit dunkeladaptierten Augen sicher zum Verschwinden zu bringen ist, liegt die Lichtstärke hinreichend weit unter der fovealen Schwelle).

Der Beobachter bringt sein rechtes Auge durch einstündigen lichtdichten Verschluß in hohe Dunkeladaptation, während er das andere Auge möglichst gut helladaptiert hält. Vor der linken Irisblende muß eine sehr starke Lichtquelle angebracht sein. Gleich nach dem Eintritt ins Dunkelzimmer vergleicht der Beobachter die Helligkeit der beiden Felder, das rechte mit dem rechten Auge, das linke mit dem linken Auge betrachtend, unter abwechselndem Schließen der Augen. Hat man die richtige Lichtstärke gewählt, das linke Feld also mindestens 1000 mal intensiver beleuchtet, als das rechte, so zeigt sich in der auffallendsten Weise der Farbenunterschied der Felder; das linke, mit dem Hellauge betrachtet, sieht im allgemeinen deutlich gelbrot aus neben dem grünlichblauen rechten, das vom Dunkelauge betrachtet wird. Vor die linke Lichtquelle müssen stark gefärbte blaue Lichtfilter vorgeschaltet werden, um Gleichheit beider Felder zu erzielen.

Eine genaue Bestimmung der Farbe des Dämmerungssehens, derart, daß sie in der Wellenlänge eines bestimmten Spektrallichtes angebbar wäre, habe ich auf diese Weise noch nicht erhalten können, da die technischen Schwierigkeiten sehr groß sind. Dagegen haben v. Kries und ich[1] auf anderem Wege Anhaltspunkte für diese Bestimmung erhalten. In Versuchen, auf die unten in anderem Zusammenhang zurückzukommen sein wird, stellten wir für das Auge eines Farbenblinden (mein eigenes) Gleichungen zwischen homogenen Lichtern und einem Gemisch aus spektralem Rot und Blau her (und zwar auf einem Felde, das wesentlich größer war, als das foveale Gebiet). Aus Gründen die erst weiter unten ganz verständlich werden können, wird eine solche Gleichung im allgemeinen ungültig, wenn man die Lichter auf beiden Hälften der Gleichung proportional schwächt (z. B. durch Verengerung des Okularspaltes) so daß mehr die Bedingungen des Dämmerungssehens eintreten. Die vorher unter den Bedingungen des vollen

[1] J. v. Kries und W. Nagel, Einfluß von Lichtstärke und Adaptation auf das Sehen des Dichromaten. Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **12**, 29.

Tagessehens eingestellte Gleichung wird dabei in doppelter Hinsicht unrichtig, einmal bezüglich der Helligkeit, dann aber auch bezüglich des Farbentons. Je mehr nämlich die Bedingungen des Dämmerungssehens eintreten, desto mehr mischt sich für den Beobachter die spezifische Farbe des Dämmerungssehens, eben jenes erwähnte Cyan, der Farbe des Feldes bei, und zwar, wie wir sehen werden, in ungleichem Maße bei den verschiedenen Spektrallichtern. Je nach der Wellenlänge des homogenen Lichtes in der eingestellten Gleichung wird also bei der Verdunkelung des ganzen Feldes dieses homogene Licht, oder die Rot-Blaumischung mehr nach Blau hin abweichen. Bestand das Gemisch aus dem Rot von 670 $\mu\mu$ und Blauviolett von 435 $\mu\mu$, so zeigte sich, daß ein homogenes Licht von der Wellenlänge 495 $\mu\mu$ (das für den Farbenblinden farblos erscheint, also seinen sog. „neutralen Punkt“ im Spektrum darstellt, bei der Abschwächung der Gesamtgleichung heller und blauer als die Mischung erschien. Dasselbe Verhalten war noch bei Lichtern bis etwa zu 485 $\mu\mu$ zu beobachten. Hatte das homogene Licht dagegen eine Wellenlänge $< 480$, so wurde bei der Verdunkelung das Gemisch blauer als das homogene Licht. Zwischen diesen Grenzen, 480 und 485 $\mu\mu$, liegt also ein homogenes Licht, das für den Dichromaten seinen Farbenton beim Übergang vom Tagessehen zum Dämmerungssehen nicht ändert. Wir haben diesen Punkt als „invariablen Punkt“ im Spektrum bezeichnet und nehmen, aus Gründen, auf die ich hier nicht näher eingehen will an, daß dieser Punkt näher der oberen Grenze, 485 $\mu\mu$ liegt. Es ist also zu vermuten, daß die Empfindungsqualität des Dämmerungssehens derjenigen ähnlich ist, die dieses Licht unter den Bedingungen des Tagessehens hervorruft. Diese ist aber nicht rein weiß, sondern sehr merklich blau. Neue Versuche[1], auf die weiter unten einzugehen sein wird, sprechen im selben Sinne. Was hier zunächst nur für den Farbenblinden gesagt ist, dürfte mit großer Annäherung auch für den sog. normalen Farbensinn gelten, da, wie aus zahlreichen noch zu besprechenden Beobachtungen hervorgeht, der Dämmerungsapparat im Auge des Normalen und des Farbenblinden durchaus übereinstimmend zu funktionieren scheint.

Übrigens ist es auch wohl denkbar, daß die unter den Bedingungen des reinen Dämmerungssehens auftretenden Lichtempfindungen in ihrer Qualität eine gewisse Schwankungsbreite aufweisen, indem sie von völliger Farblosigkeit bis zu einem Cyanblau von nicht geringer Sättigung variieren können.

Es läge nahe, dies mit einer vorausgegangenen Farbenumstimmung des Sehorgans in Verbindung zu bringen. Doch glaube ich nach meinen Beobachtungen, daß dies nicht zutrifft. Vielmehr finde ich den blauen Farbenton des Dämmerungssehens gerade nach langer Dunkeladaptation besonders deutlich hervortretend, wo von einer Farbenumstimmung nicht mehr die Rede sein kann, das Auge vielmehr im Sinne Hering's „neutral“ gestimmt sein muß.

Ich möchte hier gleich bemerken, daß es meiner Meinung nach irrig wäre, wollte man Beobachtungen wie die hier beschriebenen als Ausgangspunkt oder Stütze einer Theorie verwerten, die in den Stäbchen der Netzhaut das anatomische Substrat für die Blauempfindung überhaupt sieht. Gegen eine solche Auffassung spricht entscheidend die Tatsache, daß die Fovea centralis, die des Dämmerungssehens in seiner Eigenart gänzlich ermangelt, doch zur Vermittelung

[1] W. Nagel, Farbenumstimmung beim Dichromaten. Zeitschr. f. Sinnesphysiol. **44**, 1909.

der Blauempfindung unzweifelhaft befähigt ist. Nur unter ganz speziellen Bedingungen, bei gemischtem Funktionieren des Tages- und Dämmerungsapparats im Auge, wird sich die dem Dämmerungsapparat entspringende Blauempfindung in merklicher Weise in das Farbensehen einmischen können.

### 3. Die Dämmerungswerte reiner Lichter.

Auf die Netzhaut, die unter den Bedingungen des Dämmerungssehens funktioniert, — Zustand der Dunkeladaptation, die Lichtstärke geringer als der foveale Schwellenwert — wirken die Strahlen verschiedener Wellenlänge die einem einheitlichen Spektrum entstammen, ungleich stark erregend ein. Da die Wirkung aller qualitativ gleichartig ist, d. h. keine verschiedenen Farbenempfindungen durch kurz-, mittel- und langwellige Strahlen hervorgerufen werden, ist es verhältnismäßig leicht und genau möglich, die Wirksamkeit der einzelnen Strahlen in quantitativer Hinsicht zu vergleichen und zu messen.

Das zu diesem Zweck einzuschlagende Verfahren gestaltet sich verschieden für die Untersuchung spektraler Lichter und für mehr gemischte Lichter, wie sie von Pigmentfarben ausgesandt werden. Da das Verhalten den homogenen Lichtern gegenüber naturgemäß am meisten interessiert, sei seine Untersuchung zuerst erwähnt.[1] Sie läßt sich mit Hilfe des von Helmholtz konstruierten und weiter unten beschriebenen Spektrophotometers ausführen. Man bedarf dazu eines Apparats, der es gestattet, ein beliebiges, seiner Intensität nach in weiten Grenzen abstufbares Licht (Vergleichslicht) in nicht zu kleinem Gesichtsfeld (5—10° Gesichtswinkel) neben die verschiedenen homogenen Lichter eines Spektrums zu bringen. In dem erwähnten Helmholtzschen Apparat sieht der durch einen Okularspalt blickende Beobachter ein kreisrundes Feld von der angegebenen Größe, geteilt durch einen vertikalen Durchmesser. Die eine Kreishälfte ist mit dem Vergleichslicht erfüllt, in dem anderen werden successive die verschiedenen homogenen Lichter des Spektrums eingestellt. Als Vergleichslicht wird in der Regel ebenfalls ein homogenes Licht gewählt, etwa ein cyanblaues. Die Helligkeit dieser Feldhälfte wird zweckmäßigerweise nicht (oder doch nicht ausschließlich) durch Spaltweitenänderung reguliert, weil der Umfang der hierfür nötigen Änderungen zu groß wäre, sondern durch ein verstellbares Nicolpaar.

Die Intensität des Lichts in der anderen Feldhälfte wird für sich allein überhaupt nicht geändert, sondern die einzelnen Spektrallichter gelangen hier alle bei derselben Spaltweite in das Gesichtsfeld.

Damit die Beobachtung im Dämmerungssehen erfolgen kann, muß der Beobachter seine Augen in guter Dunkeladaptation halten. Die Intensität des gesamten Beobachtungsfeldes muß so gering sein, daß alle Farbenunterschiede verschwinden; es müssen also entweder sehr schwache Lichtquellen verwendet werden oder es wird von der Intensität einer hinreichend konstanten Lampe nur ein kleiner Bruchteil verwendet, indem vor dem Kollimatorspalt des Instruments ein Stück einer Magnesiumoxydfläche, oder eines weißen Barytpapiers, unter

[1] Vergl. F. Hillebrand, Über die spezifische Helligkeit der Farben, mit Vorbemerkung von E. Hering. Sitz. Ber. K. Akad. Wien. Mathem. naturw. Kl. XCVIII. III. 1889. J. v. Kries u. W. Nagel, Über den Einfluß von Lichtstärke und Adaptation auf das Sehen des Dichromaten (Grünblinden) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorgane. **12**, 45; auch in: Abhandlungen zur Physiol. d. Gesichtsempfindungen aus dem physiol. Institut zu Freiburg i. Br. Herausgeg. von J. v. Kries. Heft 1.

passendem Winkel geneigt, angebracht wird, auf welches die Lampe ihre Strahlen aus hinreichend großer Entfernung entsendet. Bei dieser Anordnung kann auch von einer einzigen Lichtquelle aus die Erleuchtung beider Spalten erfolgen, was immer zweckmäßig ist.

Der Reizwert einer bestimmten homogenen Strahlung für das dunkeladaptierte Auge läßt sich einfach ausdrücken in dem Intensitätswert, der dem Vergleichslicht gegeben werden muß, um völlige Gleichheit der beiden Feldhälften zu erzielen. Man kann die durch systematische Untersuchungen mit verschiedenen Lichtern eines Spektrums gewonnenen relativen Reizwerte als die Dämmerungswerte (oder Dämmerungsvalenzen) bezeichnen (v. Kries und Nagel, a. a. O.) und sie in Kurvenform darstellen.

**Tabelle XI** (nach v. Kries und Nagel)
Dämmerungswerte der homogenen Lichter.

| Wellenlänge | Dämmerungswerte in willkürlichen Einheiten |
|---|---|
| 670,8 $\mu\mu$ | ? |
| 656 | 19,3 |
| 642 | 36 |
| 628 | 110 |
| 615 | 254 |
| 603 | 276 |
| 591 | 599 |
| 582 | 1276 |
| 571 | 2061 |
| 561 | 2477 |
| 552 | 2930 |
| 544 | 3027 |
| 536 | 2820 |
| 525 | 2055 |
| 515 | 1576 |
| 505 | 1015 |
| 496 | 697 |
| 488 | 486 |
| 480 | 318 |
| 469 | 263 |
| 460,8 | 146 |
| 448 | 46 |
| 436 | 17 |

Die vorstehende Tabelle gibt die typische Verteilung der Dämmerungswerte im Dispersionsspektrum des Gaslichts für mich selbst an, die Kurven Fig. 67 veranschaulichen die Verhältnisse. Das Maximum liegt im Grün bei 544 (in anderen von mir ausgeführten Bestimmungen bei 536 $\mu\mu$), nach beiden Seiten fällt die Kurve steil ab, und zwar nach der langwelligen Seite hin am steilsten; vom Blaugrün zum Violett wird die Senkung eine sehr langsame. Am langwelligen Ende werden die Werte schon nahe der Grenze zwischen Orange und Rot so gering, daß sie kaum mehr meßbar sind und bei dem Rot von 670 $\mu\mu$ sind nur noch Spuren eines Dämmerungswertes nachweisbar, die aber nicht mehr zahlenmäßig bestimmt werden können und überdies auf der schwer vermeidlichen Beimengung diffusen Lichtes im Apparat beruhen.

Wenn ich bemerkte, diese Kurve sei typisch, so soll damit nicht nur gesagt sein, daß sie für Personen von derselben Art des Farbensinns gilt, sondern ebensowohl für den sogenannten normalen Farbensinn wie für Farbenblinde

der verschiedenen angeboren vorkommenden Typen und wie ich gefunden habe, auch für die weiter unten zu besprechenden anomalen Trichromaten.

In seinen Versuchen über den Helligkeitswert der Spektralfarben bei verschiedener absoluter Intensität hatte A. König (Ges. Abhandl. S. 144, und Beiträge zur Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane, Festschrift zu Helmholtz' 70. Geburtstag 1891 S. 309) als niedrigste Intensitätsstufe eine solche verwandt, bei der annähernd die Bedingungen des reinen Dämmerungssehen bestanden haben dürften. König erhielt bei dieser Gelegenheit das wichtige Resultat, daß sich die großen Unterschiede in der spektralen Helligkeitsverteilung, welche zwischen Normalen, Rotblinden, Grünblinden und Totalfarbenblinden bestehen, so lange die Intensität der beobachteten Lichter verhältnismäßig hoch ist, fast vollkommen verschwanden, sobald die niedrigste Intensitätsstufe angewandt wurde. Neuere Versuche lassen diese Angabe mit voller Bestimmtheit bestätigen und, wie erwähnt, auch für die anomalen Trichromaten als giltig erweisen.

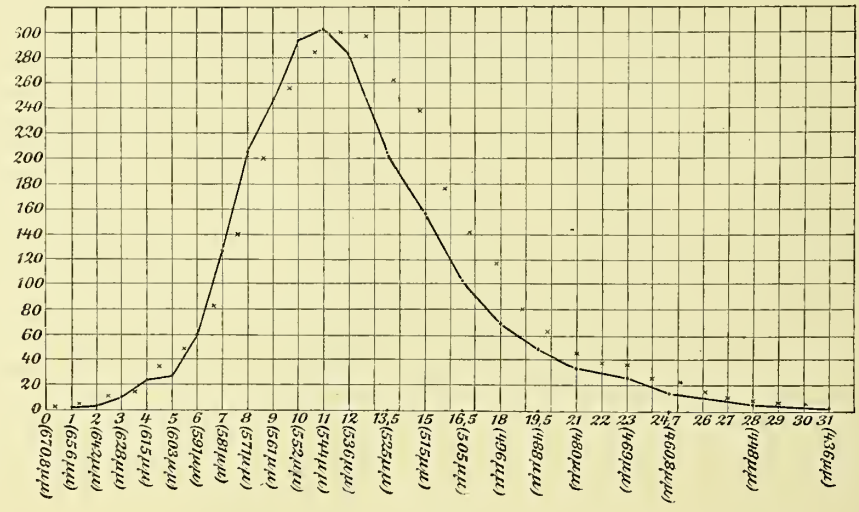



Fig. 67.

Verteilung der Dämmerungswerte im Dispersionsspektrum des Gaslichts (nach Nagel). Die Kreuze zeigen die Ergebnisse älterer, wohl etwas weniger sicherer Bestimmungen an.

In wiederholten Parallelversuchen mit Personen verschiedenen Farbensystems habe ich dies immer wieder bewährt gefunden. Es ist bis jetzt keine Form von Farbensinnsanomalie bekannt geworden, bei der sich eine merkliche Abweichung in der Verteilung der Dämmerungswerte über das Spektrum gezeigt hätte. Reine Fälle von Tritanopie (Violettblindheit) sind freilich hierauf noch nicht untersucht worden.

A. Tschermak[1] hat zu wiederholten Malen angegeben, die Adaptationsfähigkeit des Auges für lang- und kurzwellige Strahlen erfolge bei den beiden Haupttypen der Farbenblindheit (Rotblindheit und Grünblindheit) und bei zwei diesen angeblich entsprechenden Typen der Farbentüchtigen in gesetzmäßiger Weise verschieden. Ein Beweis für die Richtigkeit dieser Behauptung ist indessen weder erbracht noch auch nur versucht worden.

Selbstverständlich gelten solche Bestimmungen der Dämmerungswerte immer nur für ein bestimmtes Spektrum, die Kurven werden andere Gestalt annehmen, wenn ein Interferenzspektrum der Beobachtung zugrunde lag. Bei Verwendung

eines bestimmten Apparats fällt ferner die Verteilung der Dämmerungswerte je nach der Natur der Lichtquelle verschieden aus; eine Auerlampe mit ihrem großen Gehalt an grünen Strahlen wird eine andere Kurve geben als das rötliche elektrische Glühlicht.

Die hinsichtlich der Durchbildung der Methodik vollkommensten derartigen Bestimmungen dürften diejenigen von Schaternikoff[1] sein; sie geben für Gaslicht Werte, die den meinigen sehr nahe kommen. Die Werte für direktes Sonnenlicht und reflektiertes Himmelslicht sind in der Tabelle XII (auf S. 300) und der Kurvenfigur 68 wiedergegeben. Wie zu erwarten, findet sich bei Sonnen- und Himmelslicht der Kurvengipfel etwas mehr blauwärts (bei 529,3 $\mu\mu$) als beim Gaslicht (537,2). Das blaue Himmelslicht ergibt im Blaugrün und Blau etwas höhere Werte als das direkte Sonnenlicht.

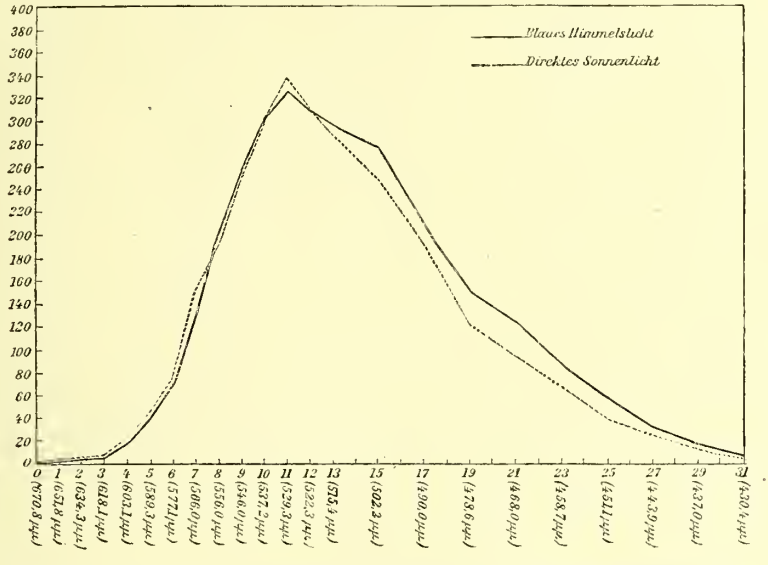



Fig. 68. Verteilung der Dämmerungswerte im Dispersionsspektrum des Sonnenlichtes und des blauen Himmelslichtes nach Schaternikoff.

Auch ohne Spektralapparat kann man sich eine ungefähre Vorstellung von der Verteilung der Dämmerungswerte verschaffen und namentlich die bedeutenden Unterschiede der Farbenhelligkeiten im Tagessehen und Dämmerungssehen zum Ausdruck bringen. Wenn man über ein gutes Sortiment gesättigt farbiger Papiere verfügt, kann man geeignete Stücke davon, etwa von Postkartengröße, bei ganz schwachem Licht so in einer Reihe ordnen, daß eine Stufenleiter vom hellsten bis zum dunkelsten Papier entsteht. Nötig ist dazu gute Dunkeladaptation und eine richtig abgepaßte Beleuchtung, bei der die Papiere nicht mehr farbig gesehen werden können. Macht man nun hinterher das Zimmer ganz hell, so erkennt man, daß im Tagessehen die gewählte Anordnung vollkommen falsch aussieht. Man hat leuchtend rote Papiere ganz ans dunkelste Ende der Reihe gelegt, auch das Orange findet man etwa neben einem Dunkelblau, das im Tagessehen sehr viel lichtschwächer erscheint als das

[1] A. Tschermak, Über physiologische und pathologische Anpassung des Auges. Leipzig 1900; Beobachtungen über die relative Farbenblindheit im indirekten Sehen. Pflügers Arch. f. d. ges. Physiol. **82**, 559. 1900; Die Helldunkeladaptation des Auges und die Funktion der Stäbchen und Zapfen. Ergebnisse d. Physiol. I, 2. 703 und 747. 1902.

**Tabelle XII** (nach SCHATERNIKOFF).[1]

| Wellenlänge | Dämmerungswerte für | |
|---|---|---|
| | blaues Himmelslicht | direktes Sonnenlicht |
| 670,8 | 7,7 | 5,9 |
| 651,8 | 12,5 | 10,5 |
| 634,3 | 22,2 | 33,3 |
| 618,1 | 70,7 | 86,3 |
| 603,1 | 189 | 214,4 |
| 589,3 | 411 | 459 |
| 577,1 | 725 | 752 |
| 566,4 | 1369 | 1535 |
| 556,0 | 2019 | 1933 |
| 546,0 | 2578 | 2546 |
| 537,2 | 3000 | 3000 |
| 529,3 | 3213 | 3353 |
| 522,3 | 3060 | 3067 |
| 515,4 | 2959 | 2833 |
| 502,2 | 2758 | 2460 |
| 490,0 | 2067 | 1935 |
| 478,6 | 1497 | 1205 |
| 468,0 | 1224 | 945 |
| 458,7 | 830 | 658 |
| 451,1 | 580 | 399 |
| 443,8 | 299 | 212 |
| 437,0 | 160 | 112 |
| 430,4 | 69 | 46 |

Orange. Andererseits sind die grünen Farbentöne auffallend weit nach dem hellen Ende der Reihe hin placiert.

Genauere Versuche, bei denen man auch Zahlenwerte für die Helligkeitsunterunterschiede erhält, sind bei Verwendung des Farbenkreisels möglich. Man läßt eine hinreichend große farbige Scheibe (von 18—20 cm Durchmesser) rotieren und setzt auf sie zwei kleinere ineinander geschobene Scheiben, Schwarz und Weiß auf, schwächt die Beleuchtung so lange, bis das gut dunkeladaptierte Auge keine Farben mehr sieht und stellt das Sektorenverhältnis Schwarz : Weiß so ein, daß das Grau der Mischung und das farblos erscheinende Dämmerlicht der größeren Scheibe genau gleich hell erscheinen. Dies läßt sich recht exakt ausführen, gibt aber natürlich keine präzisen Dämmerungswerte, da die farbigen Papiere keine homogenen Farben zeigen.

Die Kurven der Dämmerungswerte geben ein Bild von der Verteilung der Helligkeit im Spektrum, wie sie einem gut dunkeladaptierten Beobachter sich darstellen muß, der ein ganzes Spektrum unter den Bedingungen des Dämmerungssehens betrachtet, also bei einer Intensität, bei der keine Farben mehr erkennbar sind. Beobachtungen an einem derartigen lichtschwachen und farblosen Spektrum hat zuerst HILLEBRAND[2] im HERINGschen Laboratorium angestellt und dabei in der Tat gefunden, daß das Spektrum unter solchen Umständen farblos grau erscheint und daß seine hellste Stelle da liegt, wo bei einem lichtstarken Spektrum das reine Grün oder ein etwas gelbliches Grün

[1] M. SCHATERNIKOFF, Neue Bestimmungen über die Verteilung der Dämmerungswerte im Dispersionsspektrum des Gas- und Sonnenlichts. Zeitschr. f. Psychol. und Physiol. der Sinnesorgane **29**, 255, und: Abhandlungen zur Physiologie der Gesichtsempfindungen, herausgeg. von J. v. KRIES. Heft 2. 1902.

[2] F. HILLEBRAND, Über die spezifische Helligkeit der Farben. Sitz.-Ber. Wien. Akad. **98**, Abt. 3. 1889. S. 70.

gesehen wird. Wo sonst das Rot liegt, wird überhaupt nichts gesehen, während nach der violetten Seite hin das farblose Spektrum ohne erhebliche Verkürzung unmerklich zu Ende läuft.

Am anschaulichsten läßt sich die Veränderung des Spektrums zeigen, indem man ein objektives Spektrum im Dunkelzimmer projiziert und es dann durch ein im Strahlengang befindliches Nicolpaar erheblich abschwächt. Ist die Intensität von vornherein nicht allzu groß, so kann man auch durch einen Episkotister, der höchstens $\frac{1}{300}$ der Lichtmenge durchläßt, die Verdunklung bewirken. Die Beobachter müssen übrigens, wenn sie das Spektrum farblos und doch nicht allzu lichtschwach sehen sollen, zuvor sich eine gute Weile im dunklen oder doch dämmerigen Zimmer aufgehalten haben, um hinreichend adaptiert zu sein. Auf der Tafel II Fig. 1 und 2 habe ich versucht, das Aussehen des Spektrums im Dämmerungssehen in Vergleich mit dem farbigen Spektrum von höherer Intensität zu veranschaulichen.

Aus den hier beschriebenen Eigenschaften des Dämmerungssehens erklärt sich auch, wie Lummer[1] zuerst erkannte, ohne weiteres die interessante Beobachtung von H. Fr. Weber[2], daß ein im Dunkeln zum Glühen gebrachter Körper im allgemeinen nicht zuerst rotglühend, sondern grau, „düsternebelgrau" gesehen wird. Diese Grauglut tritt bei Temperaturen um 400° auf. Steigt die Temperatur, so tritt eine gelblichgrau aussehende Strahlung auf, in der spektroskopisch die gelbgrünen Strahlen besonders hervortreten. Erst bei 525° tritt nach Drapers[3] Messung Rotglut auf. Die Intensität der Strahlung bei 400° ist, obgleich vorzugsweise Strahlen von der Wellenlänge des roten Lichts ausgesendet werden, nicht groß genug, um den farbenempfindenden Apparat zu erregen, wohl aber hinreichend, um durch die Gegenwart kürzerwelliger Strahlen den Dämmerungsapparat zu erregen, der dann, wie stets wenn er allein funktioniert, farblose Lichtempfindung vermittelt. Keineswegs nimmt also beim Ansteigen der Temperatur von 400 auf 525 der Rotanteil in der gesamten Strahlung prozentisch zu, sondern im Gegenteil mit steigender Temperatur mehrt sich die Menge der mittel- und kurzwelligen Strahlen. Durch die Dunkeladaptation ist aber die Empfindlichkeit des Auges für die mittelwelligen Strahlen (gelb bis grün) weit günstiger gestellt, als für die langwelligen roten Strahlen. Es versteht sich hiernach von selbst, daß ein Beobachter, der helladaptiert ins Dunkelzimmer tritt, die Grauglut nicht wahrnehmen kann, sondern daß für ihn die erste wahrnehmbare Gluterscheinung die Rotglut ist, die er ungefähr zur selben Zeit bemerkt, wie ein Beobachter, der schon von vornherein gut dunkeladaptiert ist, und der lange vorher die graue sehen konnte.

Genau bei der gleichen Gluttemperatur können die beiden Beobachter, ein gut dunkeladaptierter und ein helladaptierter die Schwelle der roten Farbe nicht finden, sondern das Dunkelauge ist in dieser Hinsicht dem Hellauge etwas überlegen. Dies erklärt sich aus Versuchen, die ich durch Herrn Boswell[4] habe ausführen lassen

[1] O. Lummer, Grauglut und Rotglut. Verh. d. D. Physik. Ges. **16**, 121. 1897; Wiedem. Ann. **62**, 14. 1897.

[2] H. Fr. Weber, Die Entwicklung der Lichtemission glühender fester Körper. Sitz.-Ber. Akad. Berlin 1887. 9. Juni. Wiedem. Ann. **32**, 256. 1887.

[3] *Amer. Journ. of Sc.* (2) **4**, 1847; *Phil. Mag.* (3) **30**, 1847; *Scient. Memoirs* p. 33. London 1878.

[4] F. P. Boswell, Über den Einfluß des Sättigungsgrades auf die Schwellenwerte der Farben. Zeitschrift f. Sinnesphysiologie **41**, 364. 1906.

und bei welchen die Schwelle des Farbigerscheinens einer größeren Fläche bestimmt wurde einmal, indem die Fläche nur von dem farbigen Licht erleuchtet wurde. das andere Mal, indem gleichzeitig eine gewisse Menge gemischten Lichts dieselbe Fläche bestrahlte. Es zeigte sich regelmäßig, daß Beimischung von einer geringen Quantität weißen Lichts ein farbiges Licht, das an und für sich unter der Schwelle der Sichtbarkeit ist, über diese Schwelle hebt, und zwar so, daß das Licht in seiner spezifischen Farbigkeit erscheint. Ebenso wie Weißzusatz wirkt aber auch Beimischung eines beliebigen Lichtes von merklichem Dämmerungswert, z. B. von Grün. Auch durch diesen Zusatz kann z. B. ein unterschwelliges Rot über die Schwelle gehoben werden. Da das Auge dunkeladaptiert ist, wirkt das grüne Licht natürlich schon längst auf den farbenblinden Dämmerungsapparat, ehe es auf den farbenempfindenden Apparat wirkt, es kommt daher auch das komplementäre Verhältnis zwischen dem Grün und dem Rot noch gar nicht zur Geltung, sondern nur der farblose Empfindungsanteil, der gewissermaßen bahnend für die Wahrnehmung des farbigen, in unserem Falle roten, Lichts wirkt. Es versteht sich von selbst, daß diese Wirkungsweise nur bei solchen Reizstärken des bahnenden Lichts zur Beobachtung kommt, die selbst nicht weit über der Grenze der Wahrnehmbarkeit für das Dunkelauge liegen.

### 4. Das Purkinjesche Phänomen.

Die Netzhaut besitzt, wie wir sahen, im Zustande des reinen Dämmerungssehens für die langwelligen roten Strahlen (Wellenlänge $> 670$) gar keine und für das kürzerwellige Rot nur eine äußerst geringe Empfindlichkeit; tiefrote Gegenstände müssen unter solchen Umständen also völlig schwarz erscheinen, wie es auch in der Tat der Fall ist. Bei schwachem Dämmerlicht sieht die Mütze eines deutschen Infanteristen, blau mit rotem Rande, nicht anders aus wie die eines Sanitätsoffiziers mit ihrem dunkelblauen Rand.

Diese Unempfindlichkeit des Dämmerungsapparats im Auge gegen Rot macht sich nun aber nicht nur im Falle des reinen, isolierten Dämmerungssehens bemerklich, wo alle Farbigkeit verschwindet, sondern in gewissem Maße auch bei dem viel häufiger verwirklichten Fall gemischter Funktion des Dämmerungs- und des Tagesapparats im Auge. In diesem Zustande, der z. B. des Morgens früh bei Tagesanbruch deutlich ausgebildet ist, verharrt der Dämmerungsapparat im Auge infolge der vorausgegangenen längeren Dunkelheit noch in der erhöhten Empfindlichkeit, wie sie für die Dunkeladaptation charakteristisch ist. Das Dämmerlicht reicht noch nicht aus, um die Dunkeladaptation zu zerstören und Helladaptation zu bewirken. Andererseits kann das Licht aber schon stark genug sein, um den Tagesapparat zu erregen und somit auch Farbenempfindung auszulösen. Im größten Teil der Netzhaut müssen wir uns die Elemente des Dämmerungs- und des Tagessehens so innig durcheinander gemischt vorstellen, daß beim Betrachten auch nur einigermaßen größerer farbiger Flächen sich die Funktionen beider Apparate vereinigen. Die Funktion des Tagesapparats ist uns vertraut, es ist das normale Farbigsehen, wie es bei hellem Licht sich vollzieht. Dazu addiert sich nun das Dämmerungssehen, dessen Eigenschaften oben beschrieben wurden; am bemerkenswertesten war die starke Erregungswirkung der mittelwelligen, grünen und cyanblauen Strahlen, und die Unwirksamkeit der roten. Beim Betrachten grüner und blauer Objekte wird sich zu den spezifischen Farbenempfindungen die farblose bezw. bläuliche Empfindung des Dämmerlichts hinzugesellen, die Farben werden so gesehen, als ob ihnen objektiv Weiß oder Bläulichweiß zugemischt wäre, sie werden also erstens heller, zweitens ungesättigter erscheinen, als wenn die

hellen Farben bei derselben objektiven Beleuchtungsstärke von einem nicht-dunkeladaptierten Auge betrachtet werden. Solchen Objekten gegenüber indessen, die nur rote Strahlen aussenden oder reflektieren, kann sich das dunkeladaptierte Auge nicht anders verhalten, wie das helladaptierte; für den Dämmerungsapparat haben diese Strahlen keinen Reizwert, es wird also der auf den Tagesapparat ausgeübten Wirkung nichts hinzugefügt.

Die auffälligste Folge dieser Sonderstellung der langwelligen Lichter im gemischten Tages- und Dämmerungssehen muß hiernach die sein, daß rote und auch noch orangefarbene Gegenstände verhältnismäßig dunkler aussehen als blaue und grüne. Das ist eine auch in Laienkreisen wohlbekannte Erscheinung, die als Purkinjesches Phänomen bezeichnet wird. Purkinje[1] beschreibt das Aussehen der Farben in der Morgendämmerung folgendermaßen: „Das Blaue war mir zuerst bemerkbar. Die roten Nuancen, die sonst bei Tageslicht am hellsten brennen, nämlich Karmin, Zinnober und Orange, zeigen sich lange am dunkelsten, durchaus nicht im Verhältnis ihrer mittleren Helligkeit."

Daß Purkinje hier das Blau als hellstes nennt, hat wohl seinen Grund in der zufälligen Wahl der farbigen Objekte, unter denen das Grün besonders dunkel gewesen sein muß. Betrachtet man nämlich ein Spektrum, das lichtschwach ist, aber nicht dunkel genug, um farblos zu erscheinen, mit dunkeladaptierten Augen, so sieht man als hellste Stelle nicht das Blau, sondern das Grün, natürlich durch das darauf gelagerte Dämmerungslicht stark weißlich. Auch das Blau, Violett und das Gelb sind weißlich und sehr ungesättigt, um so mehr, je besser das Auge dunkeladaptiert ist. Nur das Rot ist tief dunkel und bleibt dabei eine gesättigte, nicht weißliche Farbe. Durch die Wahl einer bestimmten (recht geringen) Intensität des Spektrums und sehr gründliche Dunkeladaptation kann man es dahin bringen, daß man fast das ganze Spektrum in hellblauem Schimmer sieht, nur auf der einen Seite von der einzigen kräftigen Farbe, dem Rot begrenzt.

Besonders instruktiv ist es, wenn man bei diesen Beobachtungen nur das eine Auge dunkeladaptiert, durch lichtdichten Verschluß bei Aufenthalt in ziemlich hellem Zimmer, und dann im Dunkelzimmer das objektiv entworfene lichtschwache Spektrum abwechselnd mit dem Hellauge und dem Dunkelange beobachtet. Während das letztere des Spektrum so wie eben beschrieben sieht, fehlt für das Hellauge natürlich die Erhellung und Sättigungsminderung bei den mittel- und kurzwelligen Lichtern, und das ganze Spektrum erscheint tief dunkel, aber in allen Teilen gesättigt; die hellste Stelle liegt im Gelb, das freilich unter solchen Umständen mehr braun aussieht.

Ganz analoge Beobachtungen kann man auch mit Serien von farbigen Papieren, Wollbündeln u. dgl. anstellen, nur wird hierbei durch die geringere Sättigung der Pigment-Farben der charakteristische Unterschied der einzelnen Farben minder deutlich.

Entscheidend für das Zustandekommen des Purkinjeschen Phänomens sind, wie aus dem Mitgeteilten schon ersichtlich, zwei Faktoren, die Dunkeladaptation und die geringe Intensität der Reizlichter; auf die Bedeutung des Adaptationszustandes hat besonders Hering[2] hingewiesen, während Helmholtz

[1] Purkinje, Neue Beiträge zur Kenntnis des Sehens in subjektiver Hinsicht. Berlin 1825, S. 109—110.

[2] E. Hering, Über das sogenannte Purkinjesche Phänomen. Pflügers Arch. f. d. ges. Physiol. **60**, 519.

und A. König[1] mehr die Intensitätsverhältnisse berücksichtigten. Beide Momente müssen nebeneinander wirken, und es ist daher zu weit gegangen, wenn Hering sagt (l. c. S. 542), König habe über das Purkinjesche Phänomen geschrieben, „ohne zu erkennen, worauf es bei demselben eigentlich ankommt". Es muß vielmehr betont werden, daß ein Adaptationszustand, bei dem das Purkinjesche Phänomen zustande kommt, den größten Teil des Tages hindurch ohne weiteres besteht, und jedenfalls immer beim Aufenthalt im Zimmer; unter diesen Umständen genügt der Intensitätswechsel, um das Phänomen zu bewirken. Es bedarf, wie oben S. 269 erwähnt, besonderer Maßnahmen, um den Dämmerungsapparat für einige Zeit auszuschalten und dann gelingt dies nur auf kurze Zeit. Hält man sich längere Zeit in einem Zimmer bei der üblichen gedämpften Beleuchtung auf, und setzt nun plötzlich die Beleuchtungsstärke bedeutend herab, so ist sofort der Zustand gegeben, in dem das genannte Phänomen sichtbar ist. Hat man sich zuvor zwei große Papierstücke, rot und blau (oder grün) ausgesucht, von denen bei der vollen Tageshelligkeit das Rot ein wenig heller erscheint, so sieht man bei der geringen Helligkeit des verdunkelten Zimmers alsbald das Rot dunkler. Natürlich nimmt die Helligkeitsverschiebung bei längerer Dunkeladaptation erheblich zu, aber bei dem Zustand des Auges, den wir als den gewöhnlichen bezeichnen können, ist die Erscheinung des Purkinjeschen Phänomens durch bloßen Wechsel der Lichtstärke hervorzurufen.

Eine besonders anschauliche Demonstration des Phänomens besteht in der Projektion je einer genügend großen roten und blauen Fläche auf eine weiße Wand, unter Einschiebung einer Verdunkelungseinrichtung (Irisblende, Nicolpaar, Episkotister) in den Strahlengang. Man kann dann die beiden Farbenfelder in raschem Wechsel bei großer und bei kleiner Lichtstärke zeigen und sieht bei jeder Verdunkelung das Rot relativ viel stärker an Helligkeit abnehmen als das Blau. Auch für diese Anordnung ist es günstig, wenn der Beobachter schon einige Zeit im Dunkeln oder dämmerigen Zimmer geweilt hat, weil dann der Unterschied in dem Aussehen des Farbenpaars bei starkem und bei schwachem Licht drastischer wird. Aber auch bei dem Adaptationszustand, wie er im mäßig hellen Zimmer sich einstellt, ist das Phänomen schon deutlich.

E. Hering[2] hat bei der Erörterung der hier berührten Dinge zweierlei Arten von Adaptation unterschieden: „Daueradaptation", die durch längeren Lichtabschluß erzielt wird, und „Momentanadaptation", die sich sogleich nach der Verdunkelung einstellen soll. Auch Herings Schüler Tschermak verwendet diese Bezeichnungen. Es fehlt indessen eine nähere Bestimmung des Begriffs der „Momentanadaptation" und somit ein Anhaltspunkt dafür, was für einen im Moment der Verdunkelung sich abspielenden Vorgang die genannten Autoren im Auge haben. Die plötzliche Verdunkelung des Gesamtgesichtsfeldes wirkt bekanntlich auf das Aussehen eines kleinen hellen Gesichtsobjektes merklich ein, indem sie die Lichtempfindung qualitativ und quantitativ beeinflußt. Diese Wirkungen lassen sich aber von denjenigen der „Daueradaptation" scharf trennen. War das Auge vor dem Eintritt der „Momentanadaptation" gut helladaptiert, so tritt durch sie niemals das Purkinjesche Phänomen ein; dieses ist vielmehr an das Vorhandensein eines wenn auch ganz mäßigen Grades von Daueradaptation geknüpft, wie er eben eigentlich schon in der „Zimmeradaptation"

[1] A. König, Über den Helligkeitswert der Spektralfarben bei verschiedener absoluter Intensität. Gesammelte Abhandlungen zur physiol. Optik, Leipzig 1903, Nr. 20 S. 144.

[2] E. Hering, Über das sog. Purkinjesche Phänomen. Pflügers Arch. f. d. ges. Physiol. 60. 1895.

vorliegt. Irgendwelche Helligkeits- oder Farbengleichungen, die für das maximal helladaptierte Auge gültig sind, werden durch das, was Hering die Momentanadaptation nennt, d. h. durch plötzliche proportionale Verdunkelung beider Gleichungshälften bzw. des Gesamtgesichtsfeldes niemals ungültig. Im Wesen dessen, was wir hier Dunkeladaptation nennen, und was Hering Daueradaptation nennt, liegt als hauptsächlich bestimmendes Moment das Infunktiontreten ines neuen Reizempfängers, der nach anderen Gesetzen arbeitet als der Tagesapparat. Wir werden zu den schon genannten noch eine Reihe weiterer Unterschiede zwischen der Funktionsweise beider Apparate kennen lernen, es muß aber schon hier mit allem Nachdruck darauf hingewiesen werden, daß der Prozeß der Dunkeladaptation in dem hier gemeinten Sinne sich nicht etwa deckt mit dem Begriff der einfachen Empfindlichkeitszunahme der Netzhaut bei Lichtabschluß, also mit einer rein quantitativen Änderung der Empfindlichkeit, sondern daß eine tiefgreifende quantitative Änderung der Netzhautfunktion, am schärfsten gekennzeichnet durch das Auftreten des Purkinjeschen Phänomens, integrierender Bestandteil des Begriffs „Dunkeladaptation" ist. Wohl ist von Aubert, von dem der Name Adaptation der Netzhaut zuerst angewandt wurde, der enge Zusammenhang zwischen den quantitativen und den qualitativen Änderungen der Netzhauterregbarkeit im Dunkeln noch nicht erkannt worden, aber die von Aubert studierten Teile des Adaptationsprozesses sind eben von den im Purkinjeschen Phänomen sich charakterisierenden untrennbar und es ist daher gerechtfertigt, den Terminus Dunkeladaptation auf den ganzen komplexen Vorgang anzuwenden.

Was indessen Hering mit „Momentanadaptation" gemeint haben kann, steht zu jenen Dingen in keiner oder doch ganz entfernter Beziehung, so daß die Verwendung dieses Ausdrucks nur verwirrend wirken kann. Wenn bei einem in mittlerem Adaptationszustand (was ich oben kurz Zimmeradaptation nannte) befindlichen Auge nach plötzlicher Verdunkelung sofort Purkinjesches Phänomen zu beobachten ist, so ist das, wie nochmals betont sein möge, die unmittelbare Folge der Verdunkelung und die unmittelbare Folge des Umstandes, daß eine mäßige Daueradaptation schon vorher bestand, nicht aber ein Zeichen dafür, daß die momentane Verdunkelung schon einen wesensgleichen Prozeß im Auge herbeiführen, wie die längerdauernde Verdunkelung.

## 5. Das Fehlen des Purkinjeschen Phänomens in der Fovea centralis.

In einem zentralen Netzhautgebiet von etwa $1\,^1/_2{}^0$ Gesichtswinkelgröße kann die Erscheinung des Purkinjeschen Phänomens auf keine Weise hervorgerufen werden. Dieser Bezirk entspricht, wie wir weiter unten sehen werden, ziemlich genau dem stäbchenfreien zentralsten Teil der Netzhaut, der Fovea. Der anatomische Begriff der Fovea ist ja ein äußerst unbestimmter, was nach den Angaben von G. Fritsch[1] über die außerordentliche Variabilität in der morphologischen Gestaltung der Netzhautmitte leicht begreiflich ist. Was jedoch allen normalen Augen gemeinsam zu sein scheint, ist ein zentraler Bezirk, in dem das Sehepithel ausschließlich aus Zapfen, ohne Zwischenschiebung von Stäbchen, gebildet ist. Diesem konstanten anatomischen Befunde entspricht der physiologische einer zentralen Stelle, welche kein Purkinjesches Phänomen auftreten läßt und wenn nicht der Adaptation überhaupt doch der hier besprochenen charakteristischen Eigentümlichkeiten derselben entbehrt. Wenn ich hier von Fovea spreche, so ist damit stets der stäbchenfreie Bezirk gemeint.

Von dem Fehlen des Purkinjeschen Phänomens in diesem Bezirk kann man sich ungemein leicht überzeugen. Am anschaulichsten ist folgendes, zuerst

[1] G. Fritsch, Über Bau und Bedeutung der Avea centralis des Menschen. Berlin 1908.

wohl von O. Lummer[1] angewandte Verfahren. Man stellt zwei große farbige Flächen her, die eine rot, die andere blau oder grün, jede ungefähr $^1/_2$ bis $^3/_4$ qm groß (etwa große farbige Papierbogen oder Tuchstücke) und befestigt sie an der Wand des Dunkelzimmers so, daß die beiden Farben in gerader Linie direkt aneinander grenzen. Die Farben werden so gewählt, daß beim Licht einer hellen Gaslampe (Argandbrenner) für das normale Auge das Rot deutlich heller aussieht als das Blau. Wenn nun ein in hinreichendem Maße dunkeladaptierter Beobachter aus dem Abstand von 5 bis 6 m auf die farbigen Flächen blickt, und deren Beleuchtung durch Kleinstellen der Flamme oder sonstwie bedeutend vermindert wird, so zeigt sich das Purkinjesche Phänomen sofort aufs deutlichste: das Rot wird tief schwarzrot, das Blau hellbläulichweiß. Bei noch stärkerer Verdunkelung verschwindet die Farbe des Rot gänzlich, es sieht dann dunkelgrau bis schwarz aus. Für den hier beabsichtigten Versuch verdunkle man nun aber nur so weit, daß das Rot noch deutlich Farbe zeigt. Jetzt verdeckt man die Farbenfelder durch einen schwarzen Vorhang oder eine vorklappbare schwarze Platte bis auf ein kleines kreisrundes Stück, das zur Hälfte auf das Rot, zur andern Hälfte auf das Blau fällt. Die Größe dieses freibleibenden Stückes ist so zu wählen, daß es für den in angemessener Entfernung stehenden Beobachter unter dem Winkel von etwa $1^0$ erscheint. Solange der Beobachter dieses kleine Feldchen fixiert, ist für ihn auch bei der herabgesetzten Beleuchtung das Rot heller als das Blau, mit anderen Worten: das Purkinjesche Phänomen fehlt. Die kleinste Abweichung des Blickes läßt dagegen schon das Blau mit weißlichem Schimmer deutlich hell hervortreten. Zieht man den Vorhang wieder hoch, so sieht man sofort wieder auf dem großen Feld den starken Helligkeitsunterschied. Dieser Wechsel läßt sich beliebig oft wiederholen.

Die Vorsichtsmaßregel, die Verdunkelung nicht ganz bis zum Verschwinden des Rot zu treiben, ist deshalb zweckmäßig, weil das kleine rote Feldchen die Fixation leicht auf sich lenkt und dadurch die Abbildung des Feldes auf fovealem Feld garantiert. Andernfalls würde bei nicht geübten Beobachtern der Blick leicht abirren und eine „parafoveale“ Abbildung (schon auf stäbchenhaltigen Netzhautteilen) zustande kommen. Dichromaten und anomale Trichromaten unterliegen dieser Versuchung leichter als Farbentüchtige, da das lichtschwache Rot für sie keine so auffallende, den Blick anlockende Farbe ist.

Man kann den Versuch natürlich auch in der Weise anstellen, daß man mit einer Projektionslaterne durch Einschiebung farbiger Gläser das farbige Feld auf eine weiße Wand projiziert und die Verdunkelung durch ein Nicolpaar, die Feldeinengung durch eine eingeschobene Blende bewirkt. Auch am Spektrophotometer mit homogenen Lichtern läßt sich die analoge Beobachtung sehr gut ausführen, sofern nur das Gesichtsfeld des Apparats eine Ausdehnung auf mindestens 4, besser $10—12^0$ zuläßt, und durch Blenden bequem verkleinert werden kann.

Etwas unbefriedigend bleiben diese Beobachtungsmethoden dadurch, daß hierbei ein Lichterpaar verwendet wird, dessen beide Hälften wegen ihrer verschiedenen Farbe keine genaue Helligkeitsvergleichung zulassen. Man muß das Rot schon so wählen, daß es bei großer Beleuchtungsstärke unzweifelhaft

[1] O. Lummer, Experimentelles über das Sehen im Dunkeln und Hellen. Verhandl. d. Deutschen physik. Gesellschaft. VI, Nr. 2, 1904.

heller aussieht als das Blau, und muß andererseits eine nicht zu kurze Dunkeladaptation anwenden.

In sehr viel drastischerer Weise läßt sich der Versuch an einem Dichromaten, besonders einem sogenannten Grünblinden vorführen, für den es möglich ist, ein Lichterpaar zu finden, das für seinen Farbensinn völlige Farbengleichheit ergibt, dabei aber eine sehr beträchtliche Differenz der Dämmerungswerte für die beiden Lichter zeigt. Solche Lichter sind: Rot von der Wellenlänge 670 $\mu\mu$ (oder höher) und Grün von der Wellenlänge 545 $\mu\mu$. Im Spektrophotometer von Helmholtz kann man diese Farben auf 7° großem Feld einstellen und der Farbenblinde vermag mit gut helladaptiertem Auge eine absolut gültige Gleichung herzustellen. Wenn nun Dunkeladaptation bewirkt wird (oder schon vorher durch Verbinden des einen Auges bewirkt wurde) und die Intensität beider Feldhälften gleichzeitig beträchtlich (etwa auf $^1/_{40}$) herabgesetzt ist, so ist die Gleichung völlig ungültig, das Grün erscheint leuchtend hell und weißlich. Wenn man jetzt das Gesichtsfeld durch eine Irisblende successive verkleinert, so wird der Unterschied der beiden Feldhälften bei 3° Durchmesser schon recht gering, um bei ungefähr $1^1/_2{}^0$ gänzlich zu verschwinden. Das Auge kann beliebig lange vom Licht abgeschlossen gewesen sein, und jede beliebige Gesamtintensität des Feldes gewählt werden, die Gleichung bleibt unter allen Umständen gültig, so lange der Blick auf die Mitte des Feldes gerichtet wird. Eine Abweichung der Fixationsrichtung um 1—2° genügt aber schon, um im Grün wieder den weißlichen Schimmer auftreten zu lassen.

Ganz analoge Versuche können mit einer Gleichung gemacht werden, deren eine Seite blaugrün (etwa 500 $\mu\mu$) ist, während die andere eine Purpurmischung (etwa 650 + 460 $\mu\mu$) enthält. Hierbei hat die homogene Seite (das Blaugrün) den größeren Dämmerungswert, wird also für das Dunkelauge auf großem Gesichtsfeld heller und weißer. Der Dämmerungswert des homogenen Lichts verhält sich zu dem des Gemisches ungefähr wie 25:1. Das entsprechende Verhältnis bei der vorhin erwähnten Gleichung Rot:Grün ist mindestens 1000:1 (wenn im Rot keine Strahlen von geringerer Wellenlänge als 670 $\mu\mu$ enthalten sind).

Für den Farbentüchtigen ist es nicht möglich, wahre Farbengleichungen herzustellen, deren beide Feldhälften sich auch nur annähernd so stark in ihrem Dämmerungswert unterscheiden. Das Verhältnis des höheren Dämmerungswertes zum niedrigeren kann höchstens bis auf 6:1 gebracht werden. Dies ist der Fall bei spektralen Weißmischungsgleichungen, deren eine Hälfte ein aus Rot und Blaugrün gemischtes Weiß enthält, und deren andere Hälfte aus Gelb und Indigo gemischt ist. Solche Weißmischungen waren es, an denen die ersten Beobachtungen über das Ungültigwerden von Gleichungen bei Änderung der Intensität gemacht wurden, und zwar unabhängig und fast gleichzeitig von Christine Ladd-Franklin[1] und H. Ebbinghaus[2]. Diese Forscher verwendeten Farbenblinde als Versuchspersonen. A. Tschermak[3] übertrug diese

[1] C. Ladd-Franklin, *On theories of light sensation.* Mind. (N. S.) II. Nr. 8, 473 bis 490, 1893.

[2] H. Ebbinghaus, Theorie des Farbensehens. Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. der Sinnesorgane **5**, 145—238, 1893.

[3] A. Tschermak, Über die Bedeutung der Lichtstärke und des Zustandes des Sehorgans für farblose optische Gleichungen. Pflügers Arch. f. d. ges. Physiologie **70**, 297 bis 328, 1898.

Beobachtungen auf das Auge des Farbentüchtigen und behauptete das Ungültigwerden solcher Gleichungen auch für das foveale Netzhautgebiet, unter der Voraussetzung hinreichend lange fortgesetzter Dunkeladaptation. Indessen haben v. Kries und ich[1] unter dieser Bedingung kein Ungültigwerden irgend einer bei hohen Intensitäten geltenden Gleichungen in der Fovea des Dunkelauges finden können.

Koster[2] und Sherman[3] haben ebenfalls das Vorhandensein des Purkinjeschen Phänomens in der Fovea behauptet, doch sind durch ihre Versuchanordnungen beträchtliche Fehlerquellen bedingt. Auf die Frage, ob Spuren des Phänomens in der Fovea vorkommen, bzw. welche Bedeutung dem zuzuschreiben wäre, komme ich weiter unten zurück. Hier sei nur bemerkt, daß ich es nicht für bewiesen ansehen kann, daß in dem wirklich stäbchenfreien Netzhautbezirk Purkinjesches Phänomen auftritt.

Die Größe des zentralen Netzhautbezirkes, in dem das Purkinjesche Phänomen fehlt, kann mit einer gewissen Annäherung festgestellt werden, indem eine Spektralgleichung, deren beide Hälften möglichst ungleichen Dämmerungswert besitzen, zunächst unter Beobachtung mit einem helladaptierten Auge möglichst genau eingestellt und dann mit dem Dunkelauge betrachtet wird. Ist das Feld größer als $2^0$, so sieht das letztere Auge sofort die Ungültigkeit der Gleichung; die Größe des Feldes wird nun schnell mittels einer Irisblende verringert, bis die Gleichung wieder gültig wird. Man findet hierbei Werte zwischen 1 und $2^0$. Sehr genau kann eine solche Messung nicht wohl werden, weil die kleinsten Blickschwankungen und die dadurch bewirkten Verschiebungen des Bildes im zentralen Netzhautbezirk naturgemäß die gesuchte Größe zu klein erscheinen lassen müssen.

Wesentlich genauere Resultate konnten v. Kries und ich[4] in Versuchen erhalten, wegen deren Anordnung ich auf die Originalpublikation verweisen muß. Wir fanden für mein rechtes Auge (nach vielstündiger Dunkeladaptation durch lichtdichten Verband) eine horizontale Erstreckung des vom Purkinjeschen Phänomen freien Netzhautbezirks von 107′, für das linke Auge 88′, im vertikalen Durchmesser für das rechte Auge 81′. Der zur Fixation benutzte Punkt innerhalb dieses Bezirks liegt bei mir nicht in der Mitte, sondern etwas exzentrisch und zwar erstreckt sich der Bezirk vom Fixationspunkt aus im rechten Auge mehr temporal, im linken mehr nasalwärts, also in unsymmetrischer Anordnung. Je länger der Lichtabschluß durchgeführt wurde, desto schärfer war die Grenze zwischen dem zentralen Gebiet ohne Purkinjesches Phänomen und seiner Umgebung, in der das Phänomen eintritt.

### 6. Das sog. farblose Intervall.

In der neueren Literatur über die Gesichtsempfindungen ist vielfach von dem „farblosen Intervall“ die Rede, d. h. von einem gewissen Bereich von geringen Intensitätsstufen eines Reizlichtes, innerhalb dessen das Licht zwar

[1] J. v. Kries u. W. Nagel, Zeitschr. für Psychol. und Physiol. der Sinnesorgane **23**, S. 162.

[2] W. Koster, Untersuchungen zur Lehre vom Farbensinn. Gräfes Arch. f. Ophth. **14**, 1895 u. Arch. d'opht. **15**, 1895.

[3] F. D. Sherman, Über das Purkinjesche Phänomen im Zentrum der Netzhaut. Wundts philosoph. Studien **13**, 1898.

[4] J. v. Kries und W. Nagel, Weitere Mitteilungen über die funktionelle Sonderstellung des Netzhautzentrums. Zeitschr. f. Psychol. und Physiol. der Sinnesorgane **23**, 167—186.

sichtbar ist, aber die Qualität der Empfindung noch zu unbestimmt ist, um eine Farbigkeit erkennen zu lassen. Die tatsächliche Existenz dieses Bereiches ergibt sich aus dem oben Gesagten schon ohne weiteres, wenigstens für den Zustand der Dunkeladaptation und größere Netzhautflächen. Hierauf beruht ja auch die Möglichkeit, ein lichtschwaches Spektrum bei Dunkeladaptation farblos zu sehen. Man hat diese Tatsache auch so ausgedrückt, daß man sagt, farbige Lichter, die von einem Nullwert ausgehend an Intensität zunehmen, überschreiten zuerst die „absolute" Schwelle (Butz[1]) oder die „generelle" Schwelle (v. Kries[2]) und erst bei höherer Intensität die „spezifische" Schwelle, bei der sie farbig gesehen werden.

Verschieden beantwortet wurde die Frage, ob alle bei hoher Intensität farbig erscheinenden Lichter ein farbloses Intervall aufweisen. Parinaud gab an, daß Rot sogleich farbig, als Rot gesehen, über die Schwelle trete und auch König und v. Kries haben sich für das Zusammenfallen der generellen und der spezifischen Schwelle bei homogenem Rot ausgesprochen, während Charpentier, Koster, Hering und Tschermak auch für Rot die Existenz eines farblosen Intervalls behaupten. Dieser Widerspruch erklärt sich leicht, wenn man die oben (S. 297) angegebene Verteilung der Dämmerungswerte im Spektrum berücksichtigt. Homogene Lichter an der Grenze zwischen Rot und Orange, etwa von der Wellenlänge 650 $\mu\mu$ abwärts, zeigen noch einen meßbaren Dämmerungswert, d. h. mit anderen Worten, sie müssen ein farbloses Intervall erkennen lassen. Bei der Wellenlänge 670 aber sind die Dämmerungswerte schon fast unmeßbar klein und der kleine Anteil von Wirksamkeit auf den Dämmerungsapparat des Auges dürfte auch noch wegfallen, wenn man in dem Beobachtungsfeld alle Lichter von $< 670\,\mu\mu$ Wellenlänge durch Lichtfilter sorgfältig beseitigte, was selbst in den genauesten bisherigen Messungen wegen der technischen Schwierigkeit nicht geschehen ist. Lichter von noch größerer Wellenlänge, etwa 680—700 haben bestimmt einen Dämmerungswert = 0, können also auch kein farbloses Intervall zeigen.

Mit Pigmenten erhält man nun niemals, mit Strahlenfiltern nur unter besonderen Vorsichtsmaßregeln das langwellige Rot isoliert. Dadurch kann der Beobachter leicht zu der Meinung gelangen, auch für Rot gebe es ein farbloses Intervall. Das ist aber, wie aus dem Mitgeteilten hervorgeht, nur für das kürzestwellige Rot, an der Grenze des Orange, zutreffend und auch hier findet sich die Erscheinng nur spurenweise.

Geteilt sind die Meinungen ferner darüber, ob auch im stäbchenfreien Netzhautzentrum das farblose Intervall zu beobachten sei. Wiederum Charpentier, Koster und Tschermak sind neben anderen als Autoren zu nennen, die diese Frage in positivem Sinne beantworten, während Parinaud, König, v. Kries im Netzhautzentrum die spektralen Lichter (allenfalls mit Ausnahme des grünlichen Gelb von 580 $\mu\mu$, König) farbig über die Schwelle treten sahen. Für mich (N.), der ich Dichromat bin, kann natürlich farbloses Intervall nur bei den lebhaft farbig aussehenden Lichtern Rot, Orange, Blau und Violett in Frage kommen. Auf Feldern von geeigneter Größe, die sich im Gebiet der Fovea centralis abbilden können (also etwa $1^0$ Gesichtswinkel), treten für mich

[1] Untersuchungen über die physiologischen Funktionen der Peripherie der Netzhaut. Dissertation, Dorpat 1883.

[2] Nagels Handbuch der Physiologie des Menschen. Bd. III, S. 19. 1905.

und andere Dichromaten diese Lichter stets farbig über die Schwelle. Für nichtfarbenblinde Personen finde ich dasselbe, und zwar auch für Grün. Mit gelbem Licht habe ich keine Versuche gemacht.

Es bestehen für derartige Beobachtungen die gleichen Schwierigkeiten wie für die Entscheidung der Frage, ob es in der Fovea centralis das Purkinjesche Phänomen gibt oder nicht. Die Schwierigkeit liegt in der fovealen Fixation des farbigen Feldes. Die Gefahr ist allzu groß, daß der Beobachter, wenn ihm kein Fixierpunkt zur Festlegung der Blickrichtung geboten wird, das über die Schwelle tretende Bild des farbig erleuchteten Feldes mit extrafovealen Netzhautteilen zuerst sieht, und dann natürlich farblos (wenn es sich nicht etwa um kurzwelliges Rot handelt).

Vom theoretischen Standpunkt interessiert es wenig, ob auch im fovealen Netzhautbezirk unter irgendwelchen Bedingungen eine Andeutung von farblosem Intervall für homogene Spektrallichter nachgewiesen werden könnte. Wichtiger und sicher ist, daß es sich nur um Spuren handeln kann, die mit dem ausgeprägten Phänomen, wie es in der dunkeladaptierten Netzhautperipherie beobachtet wird, nicht in Vergleich kommen können.

Auf größeren Netzhautflächen, die in den Zustand voller Helladaptation gebracht werden, erscheinen die Farben, mindestens Rot, Orange, Grün, Blau und Violett alsdann stets sofort an der spezifischen Schwelle. Hiervon überzeugt man sich leicht, da hierbei kein Fixationszwang vorliegt. Natürlich darf man aber auch solche Felder nicht mit den ganz peripheren Teilen der Netzhaut betrachten, bei denen es so gut wie unmöglich ist, sie in volle Helladaptationszustände zu versetzen.

Tritt man nach guter Helladaptation in ein Dunkelzimmer, in welchen eine verschieden stark erleuchtbare blaue oder orangefarbige Fläche von geeigneter Größe (etwa unter 10—20° Gesichtswinkel zu betrachten) angebracht ist, und läßt die Beleuchtung von unterschwelligen zu überschwelligen Werten wachsen, so tritt die Farbe aus dem Schwarz heraus in tiefer Sättigung auf. Diese Beobachtung kann man in den ersten Minuten des Dunkelaufenthalts mehrmals wiederholen. Dann tritt aber ziemlich plötzlich eine Änderung ein: die Schwelle sinkt und gleichzeitig verliert die Farbe an Sättigung und schon nach einer Viertelstunde tritt die Lichtempfindung von unterschwelligen Reizen aus nicht mehr in der spezifischen Farbe, sondern im unbestimmten, fast farblosen Ton über die Schwelle. Dabei hat sich noch etwas anderes an dem Eindruck verändert: in den ersten Minuten erscheint die farbige Fläche, wenn sie überhaupt sichtbar ist, scharf konturiert, ist sie viereckig, so ist das sofort zu erkennen. In dem späteren Stadium der Adaptation ist die eben überschwellig beleuchtete Fläche unscharf begrenzt, die Ränder erscheinen verschwommen und zwar um so mehr, je länger die Dunkeladaptation unterhalten wird. In den ersten Minuten nach der Helladaptation sehen wir mittels des farbentüchtigen, zu scharfer Formwahrnehmung befähigten, aber relativ starke Lichtreize erfordernden Tagesapparates, in den späteren Stadien mittels des farbenblinden, nur zu unscharfer Formerkennung befähigten, aber sehr lichtempfindlichen Dämmerungsapparates. Erst wenn die Empfindlichkeit des letzteren im Laufe der Adaptation so gewachsen ist, daß sie diejenige des Tagesapparates für das im Versuch benutzte Licht übertrifft, sind die Bedingungen für das Zustandekommen des farblosen Intervalles gegeben.

In diesem Zusammenhang möge auch noch daran erinnert werden, daß die „Grauglut“ erhitzter Metalle nur dann zu sehen ist, wenn das Auge dunkeladaptiert ist. Für das Hellauge beginnt die Glut sogleich als Rotglut; das Netzhautzentrum sieht überhaupt niemals Grauglut.

## 7. Räumliche und zeitliche Unterscheidungsfähigkeit der Netzhaut im Tagessehen und Dämmerungssehen.

Im gewöhnlichen Tagessehen ist die als „Sehschärfe“ bezeichnete räumliche Unterscheidungsfähigkeit in der Netzhautmitte bei weitem am größten, schon wenige Grade abseits vom Fixierpunkt ist sie ganz erheblich geringer (siehe oben S. 31). Figur 69 veranschaulicht nach den Untersuchungen von Dor[1] den ungefähren Verlauf einer Kurve, deren Ordinaten die Sehschärfe darstellen; auf der Abszissenachse ist $F$ der Fixierpunkt, beiderseits sind die Abstände von diesen in Winkelgraden angegeben. Burchardt[2] fand die Sehschärfe bis $^1/_4$ oder $^1/_3{}^0$ abseits vom Fixierpunkt unverändert gleich der maximalen, in $^1/_2{}^0$ Abstand aber schon auf $^4/_5$ bis $^1/_2$ reduziert.

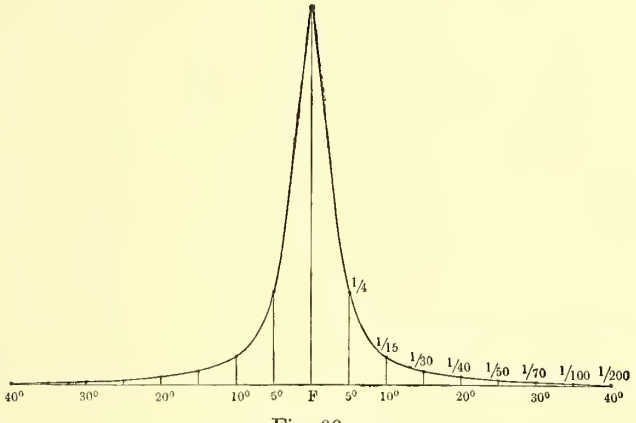



Fig. 69.
Abhängigkeit der Sehschärfe vom Netzhautort (nach Dor).

Bei dem enormen Überwiegen der fovealen Sehschärfe ist es selbstverständlich, daß im reinen Dämmerungssehen, in welchem das foveale Sehen zufolge der „physiologischen Hemeralopie“ der Fovea ausgeschaltet ist, die Sehschärfe unter allen Umständen weit hinter der maximalen Tagessehschärfe zurückbleiben muß. Streng vergleichbar ist ja eigentlich die Sehschärfe in voller Tageshelligkeit mit der im Dämmerungssehen gefundenen nicht, da die Sehschärfe von der (subjektiven) Helligkeit der Sehproben abhängig ist, d. h. innerhalb gewisser Grenzen mit sinkender Helligkeit sinkt, und selbst im gut dunkeladaptierten Auge die subjektive Helligkeit niemals so groß wie die Helligkeit im Tagessehen bei guter Tagesbeleuchtung werden kann, ohne die Schwelle der fovealen Empfindlichkeit und damit die Grenze zwischen Dämmerungs- und Tagessehen zu überschreiten. Man kann jedoch vergleichend die Sehschärfe eines gut dunkeladaptierten Auges (Dunkelauges) und die eines helladaptierten Auges untersuchen, indem man entweder die beiden verschieden adaptierten Augen bei objektiv gleicher Beleuchtungsintensität oder bei subjektiv gleicher Helligkeit beobachten läßt, in welch letzterem Fall die objektive Beleuchtung der Sehproben für das Dunkelauge viel kleiner sein muß, als für das Hellauge. Derartige Versuche haben Bloom und Garten[3] angestellt. Bei ganz schwacher

[1] Archiv f. Opthalm. XIX, 3. S. 321. 1873.

[2] Burchardt, Internationale Probe zur Bestimmung der Sehschärfe. Berlin 1893.

[3] S. Bloom und S. Garten, Vergleichende Untersuchungen der Sehschärfe des hell- und dunkeladaptierten Auges. Pflügers Arch. f. d. ges. Physiol. **72**, 372, 1898.

Beleuchtung finden sie die Sehschärfe der dunkeladaptierten Peripherie etwas höher als die des Hellauges bei gleicher Beleuchtung, schon bei geringer Steigerung der Beleuchtung überwiegt indessen das Hellauge. Bei subjektiv annähernd gleicher Helligkeit fanden die genannten Autoren die Sehschärfe des Dunkelauges stets geringer als die des Hellauges, während v. Kries[1] sie in der Peripherie für beide Adaptationszustände übereinstimmend fand. Wesentlich ist jedenfalls, daß die Unterschiede, wenn nachweisbar, verschwindend gering sind gegen die Differenzen zwischen den absoluten Sehschärfenmaximum des Hell- und des Dunkelauges.

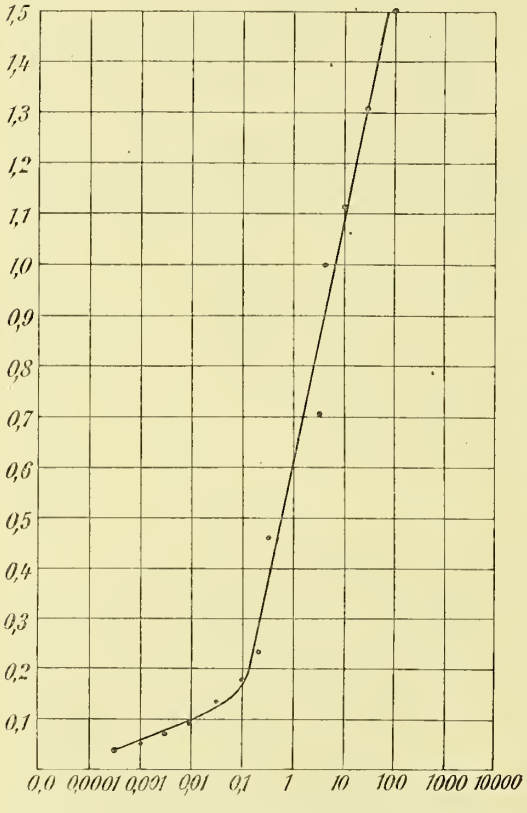



Fig. 70. Funktionelle Beziehung zwischen der Sehschärfe und den Logarithmen der Beleuchtung.

In welcher Weise die Sehschärfe quantitativ von der Bedeutungsstärke abhängt, ergibt sich aus den Messungen von A. König.[2] Bei diesen Versuchen dienten Snellensche Haken, schwarz auf weißem Grunde, als Beobachtungsobjekt, der Adaptationszustand war jeweils der der betreffenden Intensitätsstufe entsprechende, also um so vollkommenerer Dunkeladaptation, je schwächer die Beleuchtung war. Tabelle XIII, S. 313 zeigt die Resultate. Im ersten Stabe ist die Beleuchtungsintensität $B$ angegeben, auf die Einheit: Hefner-Lampe in einem Meter Entfernung berechnet. Der dritte Stab gibt die Sehschärfe $S$ an, ausgedrückt in der üblichen Snellenschen Einheit. Da, wie man aus der Tabelle sieht, eine graphische Aufzeichnung der Ergebnisse mit Verwendung der Beleuchtungsstärke $B$ als Abszissen, der Sehschärfenwerte $S$ als Ordinaten ganz unübersichtlich würde (wollte man die hohen Werte von $B$ noch aufzeichnen, so würden die kleineren Werte von $B$ fast zu einem Punkt zusammenfallen), so hat König zweckmäßigerweise den log $B$ als Abszisse gewählt, wodurch die Abhängigkeit zwischen Beleuchtungsstärke und Sehschärfe in überraschend einfacher Weise herantritt.

Man sieht die Kurve (Fig. 70) aus zwei ziemlich geradlinigen Stücken zusammen gesetzt, die in einem stumpfen Winkel aneinanderstoßen. Der Wendepunkt der Kurve liegt über dem Beleuchtungswert von 0,1 MK. Die Sehschärfe

[1] J. v. Kries, Über die Abhängigkeit centraler und peripherer Sehschärfe von der Lichtstärke. Zentralbl. f. Physiol. **8**, 694, 1895. Vergl. auch: Buttmann, Untersuchungen über Sehschärfe. Diss. Freiburg i. B. 1906.

[2] A. König, Die Abhängigkeit der Sehschärfe von der Beleuchtungsintensität. Sitz. Ber. Akad. Wissensch. Berlin, 13. Mai 1897. S. 559—575; und: Gesammelte Abhandlungen S. 378.

**Tabelle XIII** (nach A. König).

| $B$ | log $B$ | $S$ | $B$ | log $B$ | $S$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 0,00036 | 0.56—4 | 0,031 | 1,03 | 0,01 | 0,692 |
| 0,00037 | 0,57—4 | 0,046 | 1,16 | 0,06 | 0,564 |
| 0,00037 | 0,57—4 | 0,038 | 1,19 | 0,08 | 0,596 |
| 0,00038 | 0,57—4 | 0,038 | 1,38 | 0,14 | 0,615 |
| 0,00063 | 0,58—4 | 0,046 | 1,38 | 0,14 | 0,577 |
| 0,00087 | 0,80—4 | 0,055 | 1,76 | 0,24 | 0,692 |
| 0,0013 | 0,94—4 | 0,055 | 2,14 | 0,33 | 0,744 |
| 0,0022 | 0,11—3 | 0,077 | 2,20 | 0,34 | 0,795 |
| 0,0023 | 0,35—3 | 0,062 | 2,20 | 0,34 | 0,795 |
| 0,0034 | 0,36—3 | 0,092 | 2,28 | 0,36 | 0,923 |
| 0,0034 | 0,53—3 | 0,062 | 2,37 | 0,37 | 0,744 |
| 0,0043 | 0,53—3 | 0,062 | 2,97 | 0,47 | 0,667 |
| 0,0048 | 0,63—3 | 0,077 | 3,95 | 0,60 | 0,769 |
| 0,0080 | 0,68—3 | 0,088 | 4,64 | 0,67 | 0,654 |
| 0,0086 | 0,90—3 | 0,088 | 6,06 | 0,78 | 0,846 |
| 0,0091 | 0,93—3 | 0,096 | 6,81 | 0,83 | 1,115 |
| 0,0096 | 0,96—3 | 0,092 | 6,81 | 0,83 | 1,038 |
| 0,010 | 0,98—3 | 0,096 | 9,97 | 1,00 | 1,115 |
| 0,012 | 0,00—2 | 0,092 | 12,88 | 1,11 | 0,866 |
| 0,013 | 0,08—2 | 0,088 | 13,6 | 1.13 | 1,000 |
| 0,032 | 0,12—2 | 0,123 | 13.6 | 1,13 | 0,982 |
| 0,035 | 0,51—2 | 0,123 | 13,6 | 1,13 | 0,963 |
| 0,035 | 0,54—2 | 0,123 | 13,6 | 1,13 | 0,872 |
| 0,037 | 0,54—2 | 0,132 | 14,1 | 1,15 | 1,192 |
| 0,051 | 0,56—2 | 0,154 | 15,7 | 1,19 | 1,054 |
| 0,068 | 0,71—2 | 0,154 | 16,0 | 1,20 | 1,192 |
| 0,069 | 0,83—2 | 0,176 | 20.6 | 1,31 | 1,100 |
| 0,11 | 0,84—2 | 0,185 | 26,1 | 1,42 | 1,093 |
| 0,12 | 0,04—1 | 0,242 | 26,7 | 1,43 | 1,154 |
| 0,13 | 0,09—1 | 0,205 | 28,3 | 1,45 | 1,262 |
| 0,15 | 0,13—1 | 0,231 | 47,5 | 1,68 | 1,308 |
| 0,15 | 0,16—1 | 0,205 | 51,2 | 1,71 | 1,430 |
| 0,15 | 0,16—1 | 0,231 | 54,5 | 1,74 | 1,169 |
| 0,16 | 0,18—1 | 0,200 | 80,0 | 1,90 | 1,313 |
| 0,18 | 0,19—1 | 0,246 | 94,5 | 1,98 | 1,458 |
| 0,20 | 0,27—1 | 0,231 | 119,— | 2,08 | 1,540 |
| 0,22 | 0,30—1 | 0,308 | 123,— | 2,09 | 1,437 |
| 0,22 | 0,33—1 | 0,262 | 123,— | 2,09 | 1,283 |
| 0,22 | 0,34—1 | 0,308 | 168,— | 2,23 | 1,471 |
| 0,22 | 0,34—1 | 0,277 | 264,— | 2,42 | 1,568 |
| 0,24 | 0,38—1 | 0,269 | 264,— | 2,42 | 1,556 |
| 0,28 | 0,45—1 | 0,286 | 316,— | 2,50 | 1,600 |
| 0,29 | 0,46—1 | 0,308 | 494,— | 2,69 | 1,667 |
| 0,34 | 0,53—1 | 0,346 | 645,— | 2,81 | 1,683 |
| 0,35 | 0,55—1 | 0,320 | 794,— | 2,90 | 1,723 |
| 0,36 | 0,56—1 | 0,338 | 824,— | 2,92 | 1,662 |
| 0,36 | 0,56—1 | 0,359 | 878,— | 2,94 | 1,700 |
| 0,41 | 0,61—1 | 0,461 | 1042,— | 3,02 | 1,744 |
| 0,41 | 0,61—1 | 0,374 | 1082,— | 3,03 | 1,631 |
| 0,44 | 0,64—1 | 0,410 | 1261,— | 3,10 | 1,643 |
| 0,44 | 0,64—1 | 0,400 | 1975,— | 3,30 | 1,667 |
| 0,50 | 0,70—1 | 0,462 | 2346,— | 3,37 | 1,703 |
| 0,52 | 0,71—1 | 0,462 | 2500,— | 3,40 | 1,708 |
| 0,67 | 0,83—1 | 0,423 | 3511,— | 3,55 | 1,700 |
| 0,67 | 0,83—1 | 0,523 | 7413,— | 3,87 | 1,651 |
| 0,88 | 0,94—1 | 0,558 | 7413,— | 3,87 | 1,708 |
| 0,91 | 0,96—1 | 0,615 | 7900,— | 3,90 | 1,683 |
| 0,95 | 0,98—1 | 0,538 | 14040,— | 4,15 | 1,708 |
| 0,99 | 0,99—1 | 0,500 | 31590,— | 4,50 | 1,733 |
| 1,00 | 0,00 | 0,596 | 64480,— | 4,81 | 1,750 |
| 1,03 | 0,01 | 0,558 | | | |

wächst also mit steigender Lichtstärke deren Logarithmus proportional, dann eine kurze Strecke lang in komplizierter Abhängigkeit, weiterhin aber wiederum proportional, aber in viel steiler steigender Kurve. In der Abhängigkeitsbestimmung $S = a \log B$ hat der Faktor $a$ für den steileren Teil der Kurve einen etwa 10mal so hohen Wert, wie für den ersten Teil.

Beleuchtungsintensitäten (einer weißen Fläche) von 0,1 MK. liegen nun schon nahe der Schwelle des Tagessehens. Das Stück der Kurve, das links vom Abszissenpunkt 0,1 liegt, stellt also etwa den Bereich des Dämmerungssehens dar. Andrerseits hatten wir oben S. 268 festgestellt, daß die Beleuchtung einer weißen Fläche mit 1 MK. und mehr schon für ein bei großer Lichtintensität helladaptiertes Auge überschwellig ist. Diese Strecke der Kurve fällt also bestimmt in das Bereich des Tagessehens. Es bleibt die Strecke zwischen den Beleuchtungsintensitäten von 0,1 und 1 MK. übrig, die dem nicht durch sehr starke Helligkeiten abgestumpften Tagessehen wird zugeteilt werden dürfen. Pertz[1] hat die Schwelle des fovealen Sehens bei der Beleuchtung einer Magnesiumoxydfläche mit der Intensität 0,033 MK. gefunden; bei dieser Lichtstärke beginnt, wie die Kurve Fig. 70 zeigt, die Abbiegung zum steileren Verlauf hin, es mischt sich hier zuerst merklich der Tagesapparat ein, um dann bei einer etwa 10 mal größeren Beleuchtungsstärke allein bestimmend für die räumliche Unterscheidungsfähigkeit der Netzhaut zu werden. Man kann somit sagen, daß an der Grenze des Dämmerungs- und des Tagessehens ziemlich plötzlich eine andere Art von Gesetzmäßigkeit in den Beziehungen zwischen Beleuchtungsstärke und Sehschärfe Platz greift, und zwar ist der Tagesapparat in viel erheblicherem Maß von der Lichtstärke abhängig.

Der zeitliche Ablauf des Erregungsprozesses weist beim Vergleich zwischen helladaptierter und dunkeladaptierter Netzhaut ebenfalls merkliche Unterschiede auf. Wir sind allerdings noch nicht in der Lage, den Ablauf der Erregung für beide Fälle in erschöpfender Weise zu beschreiben. Feststellen läßt sich dagegen, daß bei kurzdauernder Reizung die Reaktion des Dämmerungsapparates eine trägere ist, als die des Hellaparates. Dies zeigt sich am deutlichsten bei repetierender Reizung durch schnelle Intermission oder Remission der Lichtstärke. Solche intermittierende Reizung kann in der verschiedensten Weise erzielt werden, z. B. durch Rotieren eines Episkotisters vor einer Lichtquelle oder in noch einfacherer Art, indem man auf dem Kreisel eine Scheibe mit abwechselnd schwarzen und weißen Sektoren rotieren läßt. Wenn nach langsamem Rotationsbeginn die Geschwindigkeit zunimmt, sieht der Beobachter die anfangs noch deutlich unterscheidbaren Sektoren immer undeutlicher werden, er nimmt den Wechsel von Hell und Dunkel nur noch in Gestalt des sogenannten „Flimmerns“ wahr, bis schließlich bei einer bestimmten Geschwindigkeit des Wechsels die Scheibe in gleichmäßigem ruhigem Grau erscheint. Aus der Umdrehungszeit und der Sektorenzahl berechnet man die Intermittenzzahl, bei der das Flimmern eben aufhört. Freilich ist diese Grenze nicht ganz leicht zu bestimmen, es bedarf dazu einer fest fixierten Blickrichtung und der Beobachtung unter nicht zu großem Gesichtswinkel (etwa 3—5°), zu welchem Zweck man den größten Teil der rotierenden Scheibe durch eine undurchsichtige Fläche mit entsprechend großem Ausschnitt verdeckt.

[1] In der Arbeit von v. Kries „über die absolute Empfindlichkeit usw.“ Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. der Sinnesorgane **15**, 1897.

Helmholtz gibt oben S. 179 an, daß bei stärkstem Lampenlicht für ihn auf einer Scheibe mit abwechselnden gleich breiten schwarzen und weißen Sektoren dann das Flimmern aufhört, wenn der Vorübergang eines einzelnen Sektors $^1/_{48}$ Sekunde dauert und bei Beleuchtung mit dem Licht des Vollmonds $^1/_{20}$ Sekunde.

Dieser Unterschied in der für das Verschwinden des Flimmerns nötigen Intermittenzzahl je nach der Helligkeit ist leicht begreiflich. Das Schwarz einer solchen Kreiselscheibe kann zwar nicht als absolut betrachtet werden, es reflektiert vielmehr immer etwas Licht, doch ist das natürlich viel weniger, als was von dem Weiß zurückgeworfen wird; wenn die Beleuchtung vermindert wird, äußert sich das für den Beobachter einer stillstehenden Scheibe überwiegend in einer Helligkeitsabnahme des Weiß, das in ein dem Schwarz immer ähnlicher werdendes Dunkelgrau übergeht, das mit dem Schwarz bei abwechselnder Einwirkung auf das Auge leichter, d. h. schon bei geringerer Wechselzahl verschmilzt, als es ein helles Weiß tut. Aus sorgfältig messenden Versuchen von Schaternikoff[1] geht hervor, daß für die „Verschmelzungsfrequenz", wie v. Kries die zum Aufhören des Flimmerns nötige Frequenz des Wechsels genannt hat, nicht nur die absolute Lichtstärke, sondern auch die subjektive, vom Adaptationszustand bestimmte Helligkeit des Weiß maßgebend ist. Solange die Bedingungen des Dämmerungssehens vollkommen oder wenigstens sehr annähernd eingehalten sind, steigt die Verschmelzungsfrequenz mit zunehmender Dunkeladaptation, da durch diese für die Helligkeit des Weiß derselbe Effekt erzielt wird, wie durch objektive Vermehrung der Lichtstärke.

Schaternikoff hat auch die Verschmelzungsfrequenz für das helladaptierte und das dunkeladaptierte Auge verglichen, und zwar in ähnlicher Weise, wie Bloom und Garten (a. a. O) bei ihren Sehschärfeversuchen, unter Herstellung einer subjektiven gleichen Helligkeit für Hell- und Dunkelauge, also bei objektiv sehr ungleich starker Beleuchtung. Auch unter diesen Umständen braucht das Hellauge eine größere Wechselzahl als das Dunkelauge, weshalb das Herabgehen der Verschmelzungsfrequenz bei schwacher Beleuchtung nicht nur auf die Herabsetzung der Helligkeit des Weiß bezogen werden kann, sondern das Eintreten anderer Funktionsbedingungen im Sehapparat angenommen werden muß. Bei Schaternikoff verhielt sich die Verschmelzungsfrequenz für Hell- und Dunkelauge ungefähr wie 5 : 3. Ich habe für meine Augen bei möglichst genauem Ausgleich der Helligkeit und Farbe für Hell- und Dunkelauge größere Unterschiede gefunden. Zu derartigen Beobachtungen eignen sich Scheiben, wie sie Helmholtz oben in Fig. 42 S. 180 dieses Bandes abgebildet hat. Betrachte ich nach guter Dunkeladaptation eines Auges und Helladaptation des anderen die Scheibe unter entsprechendem Ausgleich der Helligkeit, so kann die Umdrehungsgeschwindigkeit so abgepaßt werden, daß für das Hellauge der äußere Ring flimmerfrei ist, der mittlere Ring schwach und das Zentrum deutlich flimmert, während für das Dunkelauge die ganze Scheibe frei von Flimmern erscheint.

Porter[1] hat (allerdings ohne spezielle Berücksichtigung des Adaptationszustands) die Verschmelzungsfrequenz für eine Reihe von verschiedenen Beleuchtungsstärken von den stärksten bis zu den schwächsten verglichen und bemerkenswerterweise gefunden, daß die Abhängigkeit der Frequenz von der Beleuchtung durch eine Kurve ausgedrückt werden kann, die sich deutlich aus zwei annähernd geradlinigen und in einem Winkel aneinanderstoßende Stücken

[1] *Proceedings of the Royal Society London* **70**, 313.

zusammensetzt, wie die oben nach Königs Sehschärfenmessungen reproduzierte Kurve (Fig. 70). Für jedes der geradlinigen Stücke ergibt sich ein Anwachsen der Verschmelzungsfrequenz proportional dem Logarithmus der Beleuchtung, aber für jedes mit einer anderen Konstanten.

Die Analogie der beiden Kurven wird, wie v. Kries[1] hervorgehoben hat, noch vollständiger, wenn man feststellt, bei welchen Intensitäten der Knick der Kurve liegt. Diese Intensität, bei der plötzlich eine andere Abhängigkeit zwischen Lichtstärke und räumlicher bzw. zeitlicher Unterscheidungsfähigkeit Platz greift, ist in der Tat eine sehr nahe übereinstimmende (bei König $^1/_{10}$ Meter — Hefnerlampe, bei Porter $^1/_8$ Meter-Normalkerze), da wohl angenommen werden darf, daß Porters Kerze eine von der Hefnerlampe nicht allzu verschiedene Helligkeit ergibt.

Abgesehen von der Verschmelzung periodischer Lichtreize ist auch der zeitliche Ablauf der Vorgänge nach einmaliger kurzer Reizung für die Duplizitätstheorie von Interesse. Diese ziemlich verwickelten Erscheinungen sollen an späterer Stelle besprochen werden. Es wird sich dann zeigen, daß sie zwar eine erschöpfende Deutung zurzeit noch nicht gestatten, aber doch mehrere Eigentümlichkeiten darbieten, die mit großer Wahrscheinlichkeit auf ein ungleiches Abhalten des Tages- und Dämmerungsapparates hinweisen und dem gemäß auf der Grundlage der Duplizitätstheorie eine sehr frappierende Verständlichkeit gewinnen.

## 8. Die totale Farbenblindheit als Isolierung des Dämmerungssehens.

Zu der Zeit, als die erste Auflage des Handbuchs der „Physiologischen Optik“ von Helmholtz erschien, kannte man von Farbenblinden nur die zwei von Helmholtz als Rotblindheit und Grünblindheit bezeichneten und später von Holmgren unter dem Ausdruck „partielle Farbenblindheit“ zusammengefaßten Arten, welche beide imstande sind, gewisse qualitative Farbenunterscheidungen zu machen. Auf die neueren Forschungen über das Sehen dieser Personen wird weiter nnten zurückzukommen sein. Dagegen empfiehlt es sich, schon hier von der erst später, in den achtziger Jahren bekannt gewordenen und weit selteneren Form, der totalen Farbenblindheit, zu sprechen, bei der jeglicher qualitative Unterschied im Aussehen der verschiedenen Farben wegfällt und die deshalb auch Achromatopie genannt wird. Personen, die an dieser Anomalie leiden, unterscheiden an verschiedenfarbigen Objekten nur die ungleiche Helligkeit, die Qualität der Lichtempfindung aber bleibt immer dieselbe.

Hering und Hillebrand bemerkten, daß für gewisse Totalfarbenblinde die Helligkeitsverteilung im Spektrum die nämliche ist, wie für das gut dunkeladaptierte Auge im Zustande des Dämmerungssehens. Weitere Untersuchungen von König, v. Kries u. a. haben sodann gezeigt, daß die Personen, die mit dieser Art der Helligkeitsverteilung sehen, in ihrem Gesichtssinn noch eine Anzahl anderer gemeinsamer Züge aufweisen, daß ihre Anomalie, soweit bekannt, stets angeboren ist und sie somit zu einer gut abgegrenzten Gruppe der „typischen angeborenen totalen Farbenblindheit“ zusammengefaßt werden können. Es sei gleich hier erwähnt, daß es auch Achromatopen gibt, für welche die Helligkeitsverteilung im Spektrum eine ganz andere ist, daß ferner bei diesen

[1] J. v. Kries, Über die Wahrnehmung des Flimmerns durch normale und durch total farbenblinde Personen. Zeitschr. f. Psych. u. Physiol. d. Sinnesorg. **32**, 113 u. Abhandlungen zur Physiol. d. Gesichtsempfindungen, Drittes Heft 1908.

Achromatopen fast stets der Nachweis der Entstehung ihrer Anomalie durch ein Sehnervenleiden zu führen ist und sie die weiter unten zu beschreibenden übrigen Besonderheiten der Augen mit angeborener Totalfarbenblindheit vermissen lassen.

Das Spektrum erscheint dem Achromatopen als ein abschattierter Streifen ohne Farbenunterschiede, die überhaupt für ihn einen unbekannten Begriff darstellen (vergl. die Abbildung auf Tafel II). Den Ort der größten Helligkeit sieht er (bei Gaslicht als Lichtquelle) im Grün, in der Gegend zwischen 530u nd 540 $\mu\mu$. Das rote Ende, etwa jenseits der Linie *C* sieht er überhaupt nicht, dagegen ist nach dem Violett zu für ihn das Spektrum ungefähr ebenso lang wie für den Normalsehenden. Während für den letzteren nun aber diese Helligkeitsverteilung nur dann zutrifft, wenn die Intensität des Gesamtspektrums unter der Schwelle des Farbigsehens bleibt (also im reinen Dämmerungssehen), bleibt für den Totalfarbenblinden fast die gleiche Helligkeitsverteilung bestehen, ob das Spektrum lichtschwach oder lichtstark ist. Läßt man die Lichtstärke eines Spektrums von minimalen Werten aus aufsteigen, während es von einem totalfarbenblinden und einem farbentüchtigen Beobachter betrachtet wird, so ändert sich in dem Augenblick, wo für das farbentüchtige Auge das Spektrum farbig zu werden beginnt, für den Farbenblinden nichts, als daß die Gesamthelligkeit für ihn zunimmt.

Von der genauen Übereinstimmung der Helligkeitsverhältnisse der Farben für den Achromatopen und den dunkeladaptierten Normalsichtigen überzeugt man sich leicht durch Einstellung von Dämmerungsgleichungen am Farbenkreisel wie auch besonders am Spektrophotometer. Nach dem gleichen Verfahren, nach dem in der oben S. 268 beschriebenen Weise die Dämmerungswerte des Normalen bestimmt werden, kann dies auch für den Totalfarbenblinden geschehen, und zwar sowohl bei kleiner wie großer Intensität des Spektrums. Nach oben ist eine Grenze gegeben durch das Blendungsgefühl, das den Farbenblinden stört. Kurven, welche die Verteilung der Reizwerte im Spektrum des Totalfarbblinden darstellen, sind von König[1], v. Kries[2] und von mir aufgenommen worden. Tabelle XIV und Fig. 71 ent-

**Tabelle XIV.**

| Wellenlänge | Dämmerungswerte für W. Nagel. | Helligkeitswerte für die Totalfarbenblinde H. |
|---|---|---|
| 628 $\mu\mu$ | 3,1 | — |
| 615 | — | 10,0 |
| 603 | 10,0 | 13,2 |
| 595 | — | 26,1 |
| 591 | 25,9 | — |
| 580 | 45,8 | 30,0 |
| 570 | 57,8 | 52,7 |
| 561 | 65,0 | — |
| 553 | 76,0 | 81,8 |
| 545 | 88,1 | 84,9 |
| 535 | 86,3 | 88,1 |
| 528 | 81,6 | 78,3 |
| 520 | 70,2 | — |
| 514 | 61,5 | 64,5 |
| 500 | 39,0 | 43,8 |
| 488 | 24,5 | 33,7 |
| 473 | 13,5 | 18,8 |
| 457 | 6,2 | 11,5 |
| 446 | 2,5 | — |

[1] Zeitschr. für Psychologie und Physiol. der Sinnesorgane **4**, S. 241. 1892.
[2] Ebenda **13**, S. 293.

stammen der Untersuchung eines 16jährigen Mädchens (Frl. H.), das ich mit Herrn Dr. May[1] untersuchte. Es sind hier die Helligkeitswerte für Frl. H. mit den Dämmerungswerten für mich selbst (die mit den typischen normalen übereinstimmen) zusammengestellt. Die Farbenblinde beobachtete (am Helmholtzschen Spektrophotometer) im hellen Zimmer bei mittlerer, für sie nicht blendenden Intensitäten des Spektrums, ich im Dunkelzimmer nach einstündiger Dunkeladaptation durch lichtdichten Verband. Die Angaben beziehen sich auf das Spektrum der Nernstlampe. Die Übereinstimmung der beiden

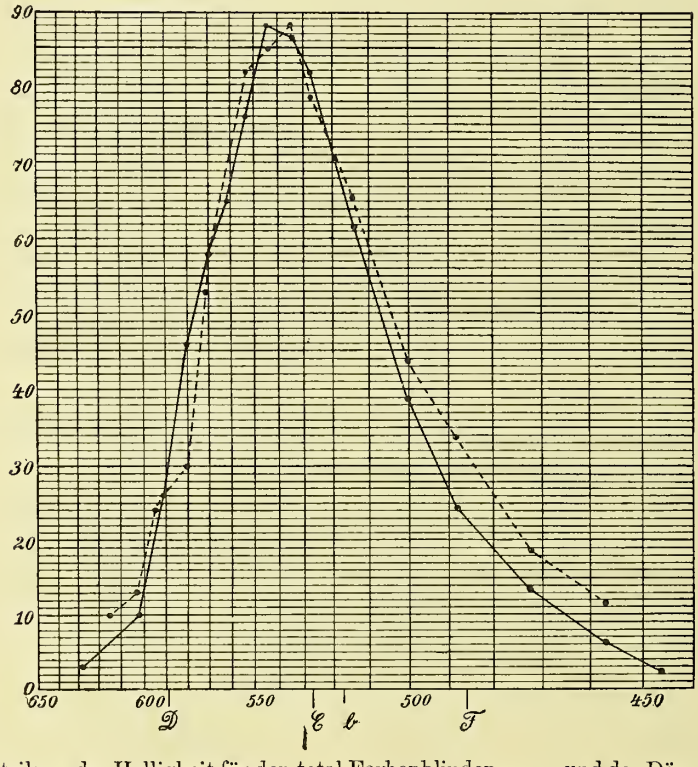



Fig. 71. Verteilung der Helligkeit für den total Farbenblinden ------ und der Dämmerungswerte für einen Deuteranopen —— im prismatischen Spektrum des Nernstlichts.

Reihen von Werten ist in die Augen fallend und noch etwas besser als in den früher von v. Kries[2] mitgeteilten Parallelversuchen zwischen mir und einem anderen farbenblinden Mädchen, hauptsächlich wohl deshalb, weil ich selbst inzwischen größere Übung in der nicht ganz leichten Einstellung der Dämmerungsgleichungen gewonnen hatte. Eine deutliche, zweifellos außerhalb der Fehlergrenzen der Einstellungen liegende Differenz der Werte der Farbenblinden und meiner eigenen zeigt sich in beiden Fällen im Grün und Blau, wo meine Dämmerungswerte niedriger sind als die Helligkeitswerte für die Totalfarbenblinden. Auf den Grund dieses Unterschiedes komme ich unten zurück, erwähnt sei hier nur, daß der Unterschied fehlen würde oder zum mindesten verringert wäre, wenn auch die Totalfarbenblinden mit vorgängiger längerer Dunkeladaptation beobachtet hätten, was hier absichtlich vermieden wurde.

[1] Zeitschr. für Psychologie und Physiol. der Sinnesorgane **42**, S. 69. 1908.
[2] Ebenda **13**, S. 293.

Die eigenartige Helligkeitsverteilung im Spektrum des Totalfarbenblinden, die mit der im Zustande des Dämmerungssehens beobachteten der Normalen oder Farbentüchtigen zusammenfällt, sowie die weiter unten zu besprechenden Beziehungen zwischen der Kurve der Dämmerungswerte und der Kurve, welche die Energieabsorption in Sehpurpurlösungen darstellen, führte A. König zu der Annahme, daß die Augen der Totalfarbenblinden als solche zu betrachten seien, welche ausschließlich durch Vermittelung der sehpurpurhaltigen Netzhautstäbchen sehen, während die Zapfen fehlen oder funktionslos sind. Das weitere Studium des Sehens der Achromatopen hat diese Annahme in einer ganz überraschenden Weise bestätigt. Das Sehen dieser Leute weist nämlich eine ganze Anzahl besonderer Eigentümlichkeiten auf, die sich zu einem charakteristischen Symptomenkomplex vereinigen.

Bei der Lichtempfindlichkeit des Sehpurpurs ist zu erwarten, daß die auf diesen Sehstoff angewiesenen Personen bei stärkerer Beleuchtung schlecht sehen, ja schließlich vorübergehend blind werden. Das ist in der Tat der Fall. Die Achromatopen sind alle in mehr oder minder hohem Grade lichtscheu, sie vermeiden es, ins helle Licht zu sehen, ihre Pupillen sind meist recht klein, die Lidspalte wird eng gemacht und der Kopf in charakteristischer Weise gebeugt gehalten, sobald von oben helles Licht kommt. An dieser Haltung und dem scheuen Blick kann man den Totalfarbenblinden leicht erkennen. Ihrer Lichtscheu wegen tragen sie auch gerne dunkle Schutzbrillen. Von den Farbenblinden, die ich kenne, wurde die Lichtscheu auch anders motiviert als von Personen, die infolge eines Augenleidens lichtscheu sind. Das Licht ist dem Achromatopen nicht schmerzhaft oder unangenehm, er merkt nur, daß er schlecht sieht, wenn er ins Helle blickt. Frl. H., die schon erwähnte Totalfarbenblinde, die Herrn Dr. May und mir für viele Beobachtungen bereitwilligst als Versuchsperson gedient hat, war leicht zu bewegen, mit einem Auge (das andere blieb verbunden) aus nächster Nähe die helle Milchglasglocke eines Auerbrenners anzublicken. Sie hatte dabei keine Schmerzen, war aber schon nach wenigen Minuten so gut wie blind, sie sah dann im Spektralapparat leuchtend helle Felder überhaupt nicht. Auch bei erweiterter Pupille ließ sie sich am Thornerschen Augenspiegel die Netzhaut in großem Umfang hell beleuchten, ohne über Beschwerden zu klagen. Auch hiernach war das Sehvermögen in dem untersuchten Auge für etwa eine Viertelstunde erloschen.

Von besonderem Interesse war natürlich, wie sich die zentrale Netzhautpartie bei den Achromatopen verhält; hier, im Gebiet der Fovea, findet sich kein Sehpurpur, findet man keine Stäbchen und hier fehlen auch die charakteristischen Erscheinungen des Dämmerungssehens. Von vornherein kann man sich verschiedene Möglichkeiten für das Verhalten dieser Netzhautpartie beim Totalfarbenblinden denken: es könnten entweder die Zapfen vollständig fehlen und der dadurch gewonnene Platz von Stäbchen ausgefüllt sein, oder es könnten an Stelle der Zapfen zwar besondere, von den Stäbchen verschiedene Gebilde vorhanden sein, die aber funktionsunfähig, jedenfalls nicht lichtempfindlich wären. Endlich könnten auch die durch Ausfall der Zapfen entstehenden Lücken nur teilweise von Stäbchen ausgefüllt sein. Je nachdem, welche dieser Möglichkeiten realisiert ist, wird man an der Stelle des Netzhautzentrums entweder eine vollständig blinde Stelle erwarten oder eine Stelle, die zwar lichtempfindlich ist, deren Erregbarkeit aber demselben Gesetze folgt, wie wir sie für das Dämmerungssehen kennen. Letzterenfalls ist namentlich

eine Sehschärfe zu erwarten, die hinter der normalen fovealen zurückbleibt und sich etwa in dem Bereich derjenigen Werte hält, wie man sie im reinen Dämmerungssehen günstigsten Falles findet. Dies trifft nun, wie v. Kries[1] gezeigt hat, in der Tat zu; die Sehschärfe erreicht bei Achromatopen unter günstigsten Umständen nur Werte zwischen $^1/_6$ und $^1/_{10}$, für ganz vereinzelte Fälle sind noch etwas höhere Werte (bis $^1/_4$) angegeben worden. Besonders interessant ist die Feststellung A. Königs, derzufolge bei steigender Beleuchtungsintensität die Sehschärfe des Totalfarbenblinden nach anderer Regel wächst, als bei Farbentüchtigen; es fehlt nämlich der Knick der Kurve (siehe Fig. 70 S. 312) an der Schwelle des Tagessehens, es läuft vielmehr für den Totalfarbenblinden die Kurve auch bei Beleuchtungsintensitäten über 0,1 HK. ziemlich geradlinig in der Verlängerung des schwach ansteigenden ersten Kurventeils weiter. Bald wird dann ein Maximum erreicht, wo die eintretende Blendung die Formwahrnehmung stört. Diese Beobachtungen stehen durchaus im Einklang mit der oben gemachten Annahme, daß bei Beleuchtungsintensitäten von 0,1 MK. und mehr der in den Zapfen repräsentierte Tagesapparat für die Sehschärfe bestimmend wird, der dem Totalfarbenblinden fehlt.

Eine für Licht völlig unempfindliche, also blinde Stelle in der Netzhautmitte, ein „zentrales Skotom" ist bei einem Teil der Totalfarbenblinden gefunden worden, bei einem anderen Teil dagegen nicht nachweisbar gewesen. Für A. König war es ein besonders schwerwiegender Beweis für die Richtigkeit seiner Auffassung von der Funktion der Stäbchen, daß in dem von ihm untersuchten Fall von Achromatopie ein zentrales Skotom vorhanden war. Andrerseits wollten Hering und Hess aus der Unauffindbarkeit einer solchen defekten Stelle ernste Bedenken nicht nur gegen die Königsche Theorie sondern auch gegen die Duplizitätstheorie in der von v. Kries vertretenen Form ableiten. Indessen hat schon v. Kries, der bei einem sorgfältig untersuchten Fall kein Skotom nachweisen konnte, betont, daß diesem Punkte keinerlei ausschlaggebende Bedeutung für oder wider die Duplizitätstheorie einzuräumen sei. Wir wissen einstweilen noch gar nichts sicheres über die Entstehungsursache der totalen Farbenblindheit, können also auch durchaus nicht behaupten, daß bei Ausfall der Zapfenfunktion nun auch die normalerweise nur von Zapfen besetzte zentrale Netzhautpartie jeglicher überhaupt funktionsfähiger Elemente ermangeln müsse, ja man möchte es als ebenso leicht möglich bezeichnen, daß an Stelle der Zapfen die Stäbchen entstanden sind, die die Lücke ausfüllen. Dementsprechend ließe sich denken, daß die Fälle mit Skotom (Grunert stellt deren 10 zusammen) und die ohne solches (8 in der Grunertschen Zusammenstellung) zwei verschiedene Entstehungsarten der totalen Farbenblindheit im fetalen Leben entsprechen. Es gibt indessen noch eine andere Möglichkeit, die nämlich, daß auch in denjenigen Fällen totaler Farbenblindheit in denen bisher ein Skotom nicht gefunden wurde, ein der Fovea entsprechendes zentrales Skotom zwar vorhanden ist, sich aber dem Nachweis entzieht.

Die Feststellung eines Skotoms von der Größe des stäbchenfreien Bezirks, $1—1^1/_2{}^0$ Gesichtswinkel entsprechend, ist schon dann nicht leicht, wenn die durch einen pathologischen Prozeß für Licht unempfindlich gewordene Netzhautstelle abseits von der Fovea liegt; noch weit schwerer aber ist der Nachweis des wirklich zentral gelegenen Skotoms. Hauptbedingung für die Auf-

[1] Zentralblatt für Physiologie 1894. S. 694.

findung so kleiner Defekte im Gesichtsfeld ist ja die Festhaltung einer bestimmten Blickrichtung und diese Bedingung ist nur dann erfüllbar, wenn die Fixation mit der Fovea möglich ist. Ich halte es daher auch bei dem von mir genau auf Vorhandensein eines zentralen Skotoms untersuchten neuen Fall (Frl. H.) trotz des negativen Ergebnisses für möglich, daß ein kleines Skotom vorhanden, aber sehr schwer zu finden ist.

Bei fast allen Achromatopen wird Nystagmus, d. h. ein unruhiges, oft sehr schnelles Hin- und Herschwanken des Blickes, beschrieben. Wenn man die Augen solcher Personen beobachtet, so bemerkt man besonders lebhaften Nystagmus dann, wenn sie einen Gegenstand ins Auge fassen, also fixieren sollen und wollen; sie können eben nicht fest fixieren. Dies gibt dem Blick der Totalfarbenblinden noch einen besonderen Ausdruck, der sich den durch die Lichtscheu bedingten Eigentümlichkeiten beigesellt. Die Tendenz zu strenger Koordination der Bewegungen beider Augen und zum dauernden Binokularsehen fehlt oder ist doch vermindert, und die Folge davon ist eine eigenartige Unabhängigkeit der Bewegungen beider Augen, wie ich sie bei Frl. H. besonders auffallend fand, oder aber das Auftreten von dauerndem Schielen. Strabismus divergens wird bei einem so großen Teil der untersuchten Fälle angegeben, daß sein Zusammentreffen mit der totalen Farbenblindheit kein Zufall sein kann. Wenn die Tendenz zum Binokularsehen wegfällt, wie unmittelbar vor dem Einschlafen oder bei geschlossenen Augen, so divergieren bekanntlich die Augenachsen meistens. In leichter Divergenzstellung scheint das System der äußeren Augenmuskeln am meisten entspannt zu sein und es ist daher wohl begreiflich, wenn bei Wegfall der binokularen Fixationstendenz wegen Defekts im fovealen Sehen ebenfalls die Neigung zu divergenten Stellungen auftritt.

Ich möchte betonen, daß das Vorhandensein von Nystagmus und Strabismus oder, anders betrachtet, das Fehlen einer *festen* Fixationsstelle in der Netzhautmitte nicht notwendig zur Annahme eines zentralen Skotoms an Stelle der Fovea führt, sondern ebensowohl vereinbar wäre mit der Ausfüllung des Foveagebiets durch Elemente, die nach Art der Stäbchen funktionierten. Das Fehlen einer zum scharfen Sehen ganz besonders befähigten Stelle allein genügt schon, um einigermaßen verständlich zu machen, daß die Blickrichtung in solchem Falle häufig und schnell gewechselt wird. Noch erklärlicher wird dies bei der Annahme, daß der Stäbchenapparat schneller ermüde, als der Zapfenapparat der Fovea, eine Annahme für die mancherlei Anhaltspunkte existieren.

Als einen charakteristischen Unterschied des Tages- und des Dämmerungssehens haben wir oben das ungleiche Verhalten bei kurzdauernden, in schneller Folge wiederholten Lichtreizen kennen gelernt. Auch hierin gleicht das Sehen des Totalfarbenblinden dem Dämmerungssehen. Eine rotierende Scheibe mit abwechselnd schwarzen und weißen Sektoren hört, wie oben gesagt, im Dämmerungssehen schon bei merklich geringerer Umdrehungszahl auf zu flimmern, als im Tagessehen bei gleicher subjektiver Helligkeit. Uhthoff hat auf Anregung von v. Kries bei einigen von ihm beobachteten Totalfarbenblinden festgestellt, daß diese auch bei größeren Beleuchtungsintensitäten, die für das normale Auge über der Schwelle des Tagessehens liegen, die Scheibe schon flimmerfrei sehen, wenn die Umdrehungsgeschwindigkeit für den Nichtfarbenblinden noch zu gering ist, um das Flimmern verschwinden zu lassen. Ich fand bei der totalfarbenblinden Frl. H. diesen Befund durchaus bestätigt.

Also auch hierin liegt wieder eine volle Analogie zwischen dem Sehen des Achromatopen und dem Dämmerungssehen, eine weitere Stütze für die Annahme, daß der Totalfarbenblinde dauernd nur mittels der Netzhautelemente sieht, die sonst das Dämmerungssehen vermitteln.

### 9. Die Hemeralopie als Störung des Stäbchenapparates.

Parinaud sah eine der wesentlichsten Stützen der Duplizitätslehre in dem Verhalten des Licht- und Farbensinns bei der sog. Nachtblindheit oder Hemeralopie. Die neueren Untersuchungen haben diese Anschauung Parinauds durchaus bestätigt. Man kann in der Hemeralopie eine Art Gegenstück zu der totalen Farbenblindheit sehen; wie bei letzterer, im Sinne der Duplizitätstheorie gesprochen, eine Isolierung des Stäbchenapparats, unter Ausfall der Zapfenfunktion vorliegt, so wird umgekehrt bei der Hemeralopie die Zapfenfunktion mehr oder weniger intakt gefunden, bei stark geschädigtem Stäbchenapparat. Freilich hat in denjenigen Fällen, in denen der Stäbchenapparat als gänzlich ausgeschaltet gelten kann, der Zapfenapparat wohl immer auch schon erheblich gelitten, so daß wir nicht etwa eine Netzhaut vor uns haben, in der ausschließlich die Stäbchen funktionsunfähig geworden sind. Doch wird eine entschiedene Annäherung an diesen Zustand erreicht.

Bei der Hemeralopie ist das Adaptationsvermögen stark beeinträchtigt und zwar kann entweder die Dunkeladaptation nur verzögert sein, so daß die normalerweise in $^1/_2$ Stunde erreichten Empfindlichkeitswerte erst nach mehrstündigem Lichtabschluß erreicht werden; oder die Adaptationsbreite ist mehr oder weniger stark eingeschränkt, und die Patienten lassen dann auch nach längerem Lichtabschluß nur eine mäßige Zunahme der Lichtempfindlichkeit erkennen. Bei höheren Graden ist stets sowohl die Adaptationsbreite wie die Adaptationsgeschwindigkeit vermindert. Wie oben S. 269 erwähnt, kann die Empfindlichkeit enorm vermindert sein. Dabei pflegt, und das ist theoretisch bedeutsam, die foveale Schwelle im Zustande der Helladaptation ganz oder fast ganz normal zu sein. Bei guter Helladaptation und im hellen Tageslicht erscheint überhaupt das Sehvermögen der Hemeralopen mäßigen Grades meistens so gut wie normal. Eine gewisse Amblyopie ist dagegen bei hohen Graden die Regel, was bei der Entstehung des Zustands aus krankhaften Prozessen in der Netzhaut und Aderhaut weiter nicht verwunderlich ist. Der Farbensinn weist, wenn keine angeborene typische Anomalie vorliegt, keinerlei erhebliche Defekte auf. Das einzige, was gelegentlich auffällt, ist eine Herabsetzung der Empfindlichkeit für blaues Licht, besonders im fovealen Sehen. Kleinere dunkelblaue Objekte, wie Kornblumen im Felde, werden nicht als blau, sondern einfach als „Dunkel“ gesehen. Ebenso sieht das normale Auge nach Blendung durch sehr helles Licht.

Besonders bemerkenswert und theoretisch wichtig ist das Verhalten des Hemeralopen gegen langwelliges rotes Licht. Während er nach einigem Dunkelaufenthalt (von 10—20 Minuten) einem ebensolange dunkeladaptierten Normalsehenden an Empfindlichkeit gegen gemischtes farbloses Licht auf überfovealer Fläche weit nachsteht, ist die Schwelle für rotes Licht bei leichten Graden gar nicht, bei mittleren Graden nur ganz wenig höher als für den Normalen.

Hiermit steht im Zusammenhang, daß das Purkinjesche Phänomen (siehe oben S. 302) für den Hemeralopen weit weniger deutlich auftritt als für den Normalen. Bringt man im Dunkelzimmer eine große rote und eine grüne

Fläche nebeneinander an und hat man die Farben so gewählt, daß sie im Tagessehen für den Normalen wie für den Hemeralopen etwa gleich hell aussehen, und treten nun die beiden Beobachter gleichzeitig ins Dunkelzimmer, das nur schwachen Lichtschein erhält, so erscheint nach wenigen Minuten bekanntlich das Grün dem Normalen sehr viel heller als das Rot, während der Hemeralop noch nichts von dieser Veränderung bemerkt. Erst weit später tritt auch für ihn das Phänomen auf. Stellt man quantitative Versuche über die Helligkeitszunahme des kurzwelligen Lichtes an, so ergibt sich für den Normalen nach etwa halbstündigem Dunkelaufenthalt eine 10—100 fach größere Helligkeitszunahme als für den Hemeralopen. In vorgeschrittenen Fällen von Pigmentatrophie der Netzhaut, die stets mit Nachtblindheit einhergeht, kann das Dämmerungssehen vollkommen vernichtet sein; das Gesichtsfeld ist dann bedeutend eingeschränkt und in dem noch vorhandenen zentralen Gesichtsfeldrest ist das Purkinjesche Phänomen überhaupt nicht mehr hervorzurufen. Für solche Patienten bleibt das Helligkeitsverhältnis eines Farbenpaars, wie es ihnen in voller Tageshelligkeit erscheint, auch bei schwacher Beleuchtung und nach längerem Dunkelaufenthalt unverändert bestehen.

Über die zeitlichen Verhältnisse der Lichtempfindung bei Hemeralopen ist noch wenig bekannt, insbesondere steht nicht fest, ob bei ihnen die „Verschmelzungsfrequenz" bei regelmäßig intermittierendem Lichtreiz (siehe S. 315) sich in gleicher Weise mit dem Adaptationszustand ändert, wie beim Normalsehenden, oder ob bei ihnen die gesamte Netzhaut sich ähnlich verhält wie sonst nur der zentrale Netzhautbezirk. Es ist sehr wahrscheinlich, daß dies in den früheren Stadien der Dunkeladaptation der Fall ist, daß aber bei längerem Lichtabschluß auch beim Nachtblinden sich das, was vom Dämmerungsapparat noch funktionsfähig geblieben ist, sich durch den gestreckteren Ablauf des Erregungsprozesses und demgemäß niedrigere Verschmelzungsfrequenz bemerklich macht, wie es auf Grund der oben beschriebenen Schaternikoffschen Versuche für den Normalen zutrifft (vgl. S. 315).

Das unten zu besprechende sogenannte Purkinjesche Nachbild, das eine Eigentümlichkeit der Stäbchenerregung darzustellen scheint, wurde von einem durch J. v. Kries untersuchten Hemeralopen nicht wahrgenommen; und auch einige Hemeralopen, denen ich das Nachbild zu zeigen suchte, konnten trotz günstiger Versuchsanordnung nichts davon wahrnehmen. Bei leichteren Formen fehlt das Purkinjesche Nachbild nicht, doch habe ich den Eindruck, daß sie es nicht so leicht wahrnehmen, wie Beobachter mit gesunden Augen. Diese Beobachtungen stehen, wie man sieht, mit der Duplizitätstheorie und der Parinaudschen Auffassung der Nachtblindheit in gutem Einklang. Weitere Untersuchungen würden besonders bei solchen Fällen von Interesse sein, in denen das eine Auge ausgesprochen hemeralopisch ist, das andere aber noch nicht oder nur in geringem Grade. Dabei müßte natürlich subjektiv gleiche Helligkeit der Reizlichter für beide Augen angestrebt werden.

Während die hier mitgeteilten Befunde über den Licht- und Farbensinn der Hemeralopen für die Richtigkeit der Hypothese Parinauds sprechen und auch mancherlei Tatsachen aus der Pathogenese hemeralopischer Zustände, auf die hier nicht eingegangen werden kann, in gleichem Sinn verwertet werden können, hat Hess[1] sich neuerdings sehr energisch gegen die Verwertung der

[1] C. Hess, Untersuchungen über Hemeralopie. Arch. f. Augenheilk. LXII. 1908.

Befunde bei Hemeralopie zur Stütze der Duplizitätslehre ausgesprochen. Hess hat festgestellt, daß die von ihm untersuchten Nachtblinden das Purkinjesche Phänomen wahrnehmen konnten, daß sie im Netzhautzentrum nach Dunkeladaptation geringere Lichtempfindlichkeit aufweisen, als in der Peripherie, daß sie rote Pigmente bei schwachem Licht farblos sehen können und anderes mehr. Diese Befunde decken sich mit solchen, die ich bei verschiedenen Hemeralopen erheben konnte. Aus solchen Befunden aber mit Hess zu schließen, die Parinaudsche Hypothese von der Entstehung der hemeralopischen Symptome durch Schwund des Sehpurpurs sei hierdurch widerlegt, ginge nur an, wenn die Hypothese behauptete, jeder Hemeralop ermangle völlig des Sehpurpurs bzw. des Dämmerungsapparates im Sinne von v. Kries. Daran denkt aber wohl niemand ernstlich. Die Hemeralopie kommt als Symptom einer Anzahl von Augenkrankheiten in den verschiedensten Graden vor, sie ist in vielen Fällen progressiv; demnach kann es nicht wundernehmen, wenn bei leichten und mittleren Graden noch die von Hess erwähnten Erscheinungen nachweisbar sind, die v. Kries, Parinaud, ich und andere als Ausdruck einer Beteiligung des Dämmerungsapparates am Sehen deuten. Der Dunkeladaptationsprozeß, durch den der Dämmerungsapparat allmählich neben dem Tagesapparat eingeschaltet und funktionsfähig gemacht wird, spielt sich beim Hemeralopen vielfach nur langsamer ab, als beim Normalen, das Purkinjesche Phänomen tritt später und eventuell schwächer auf, oft nur in kaum nachweisbaren Spuren. Auch die Zunahme der absoluten Lichtempfindlichkeit im Dunkeln ist beim Hemeralopen nicht aufgehoben, sondern nur verlangsamt und vermindert. Die Versuche von Hess beweisen nur, das gewisse mit der Adaptation einhergehende qualitative Änderungen im Farbensehen trotz Bestehens von Hemeralopie auftreten können. Das ist nie geleugnet worden. Auch widerspricht es den hier vertretenen Auffassungen durchaus nicht, wenn gezeigt werden kann (was durch Hess übrigens nicht geschehen ist), daß der Zapfenapparat bei Hemeralopie häufig oder immer auch mit leidet. Das Hervorstechende im Symptomenbild ist die starke Schädigung des Dämmerungsapparates, neben der eine etwaige Läsion des Tagesapparates ganz zurücktritt. Wenn übrigens aus Parinauds Angaben entnommen werden kann, daß er das Vorkommen ganz isolierter Schädigung des Stäbchenapparates behaupten wollte, so könnte eine solche positive Angabe doch nicht ohne weiteres in Zweifel gezogen werden.

## 10. Theoretisches zur Duplizitätstheorie.

Die in den vorhergehenden Abschnitten mitgeteilten Beobachtungen zeigen, wie die Netzhaut unter dem Einfluß längerdauernden Lichtabschlusses tiefgreifende Änderungen ihrer Funktionsweise erleidet; sie zeigen ferner, daß an den auffälligsten und bedeutendsten dieser Änderungen das Netzhautzentrum, die Fovea centralis, nicht teilnimmt. Zwar nimmt auch in der Netzhautmitte eines vorher hell beleuchteten und nun plötzlich ins Dunkle gebrachten Auges die Lichtempfindlichkeit zu, aber, wie ich oben mitteilte, beträgt diese Zunahme selbst unter günstigsten Umständen, nämlich nach vorausgegangener sehr starker Helladaptation nur einen kleinen Bruchteil des in der Peripherie zu findenden Empfindlichkeitszuwachses, sie spielt sich ferner in wenigen Minuten ab, um dann einem annähernd stationären Zustand Platz zu machen. Die Netzhautperipherie weist bei gleicher Größe des leuchtenden Objekts eine Empfindlichkeitszunahme um das Mehrtausend-

fache auf, die sich auf eine halbe bis ganze Stunde verteilt und auch nach dieser Zeit noch nicht ihr Ende erreicht hat. Am auffälligsten aber ist der Unterschied im Verhalten gegen Lichter verschiedener Wellenlänge: in der Fovea betrifft die Empfindlichkeitsänderung alle Lichtarten in ganz gleichem Maße, in der Peripherie stellen sich enorme Unterschiede zwischen langwelligem und mittel- bzw. kurzwelligem Licht heraus. Der Prozeß in der Fovea macht den Eindruck eines einfachen Erholungsvorganges, wie er sich in ganz analoger Weise auch bei anderen Sinnesorganen, z. B. dem Ohr bemerken läßt; die Adaptation der Netzhautperipherie an die verschiedenen Intensitätsstufen dagegen ist mit augenfälligen qualitativen Änderungen der Reaktionsweise verbunden. Diese, zusammengehalten mit den erheblichen quantitativen Veränderungen der Erregbarkeit, finden ihre zwangloseste Erklärung, wenn man sich auf den Boden der Duplizitätstheorie stellt, wie sie v. Kries[1] formuliert hat: „Wir würden hiernach," schreibt der genannte Forscher, „den Stäbchen die Eigenschaft zuschreiben, sehr starke Adaptationsveränderungen durchlaufen zu können, dabei nur farblose Helligkeitsempfindungen hervorzurufen, endlich von den verschiedenen Lichtern in eben denjenigen Verhältnissen affiziert zu werden, wie es der beim Dämmerungssehen stattfindenden Helligkeitsverteilung im Spektrum entspricht. Dagegen hätten wir uns die Zapfen als relativ wenig adaptationsfähig, im Zentrum und seiner näheren Umgebung farbentüchtig, durchweg aber von solcher Beschaffenheit zu denken, daß auch die langwelligen Lichter stark auf sie einwirken und somit bei ihrer Tätigkeit die dem Tagessehen eigentümlichen, die langwelligen Lichter begünstigenden Helligkeitsverhältnisse Platz greifen."

Nach dem oben, S. 293, Gesagten würden wir diesen Sätzen vielleicht noch die Vermutung hinzuzufügen haben, daß die von den Stäbchen vermittelte Empfindung in ihrer Qualität je nach Umständen zwischen farblos und bläulich variieren kann.

Auf Grund der Beobachtungen über die Verschmelzungsfrequenz rotierender Scheiben haben wir ferner mit v. Kries einen langsameren, gedehnteren Ablauf des Erregungsprozesses im Dämmerungsapparat des Auges, theoretisch gesprochen also in den Stäbchen, anzunehmen. In der räumlichen Unterscheidungsfähigkeit erreichen die stäbchenhaltigen Netzhautteile nirgends auch nur annähernd die gleiche Stufe, wie die ausschließlich Zapfen enthaltende Fovea. Die Versuche von Piper und von Henius endlich (siehe oben S. 284), welche über die verschiedene Art der Abhängigkeit der Lichtempfindlichkeit von der Ausdehnung der gereizten Netzhautfläche einerseits im Tagessehen, andererseits im Dämmerungssehen Auskunft geben, lassen erkennen, daß auch die räumliche Summierung der Erregungen im Dämmerungsapparat eine viel größere Rolle spielt als im Tagesapparat.

Man kann nun fragen, ob und inwieweit diese Differenzen in der Erregbarkeit der Stäbchen und Zapfen, welche die Duplizitätstheorie behauptet, mit bestimmten anatomischen, physikalischen oder chemischen Eigenschaften der lichtempfindlichen Elemente in Einklang gebracht werden können. Hier stimmen nun die anatomischen Feststellungen von Ramon y Cajal[2] bezüglich der Nervenverbindungen der Stäbchen und Zapfen sehr gut mit den beobachteten

[1] Nagels Handbuch der Physiologie des Menschen. Bd. III. S. 185.

[2] Vergl. hierzu R. Greeff, die mikroskopische Anatomie des Sehnerven und der Netzhaut. Graefe-Sämischs Handbuch d. Augenheilk. 2. Aufl. 1, (5) 1901.

physiologischen Tatsachen. Von den Zapfen, insbesondere denjenigen des fovealen Gebiets, wird heute wohl allgemein angenommen, daß jeder einzelne für sich in eine Faser übergeht, und daß auch im weiteren Verlauf der Leitung in der Netzhaut und im Sehnerven die Leitung wenigstens bis zu einem gewissen Grade isoliert bleibt, während andererseits die Stäbchen durch Querverbindungen in der Netzhaut gruppenweise zusammengefaßt sind. Gemäß den von Helmholtz entwickelten Anschauungen (siehe oben S. 32) muß das Verhalten der Zapfen für feinere räumliche Unterscheidung sehr günstig, das der Stäbchen dagegen relativ ungünstig sein, während andererseits die Gruppenanordnung der letzteren die Summierung von räumlich getrennt einwirkenden Lichtreizen begünstigen muß. Wenn beispielsweise zehn Stäbchen derart miteinander leitend verbunden sind, daß ihre Erregungen nur einer einzigen Sehnervenfaser als gemeinsamer Ableitungsbahn zufließen müssen, so wird die Reizung zweier Stäbchen dieser Gruppe nicht zu räumlich unterscheidbaren Lichtempfindungen führen, es wird vielmehr nur eine im räumlichen Sinne einheitliche Lichtempfindung zustande kommen, die aber stärker ist, als wenn nur ein Stäbchen gereizt würde. Die Ausbreitung eines Lichtreizes auf mehrere Stäbchen einer Gruppe macht sich subjektiv durch die Zunahme der Helligkeit bemerkbar.

Natürlich soll nicht gesagt werden, daß zwischen den Zapfen z. B. des fovealen Gebiets jede räumliche Reizsummation fehle, es handelt sich vielmehr offenbar nur um quantitative Unterschiede von allerdings recht erheblichem Betrag.

Weniger greifbare Anhaltspunkte haben wir für die Erklärung der geringeren zeitlichen Unterscheidungsfähigkeit des Dämmerungsapparates. Man könnte an kompliziertere Umschaltungsverhältnisse in der Netzhaut, Einschaltung mehrerer Neurone in die Leitung des Dämmerungsapparates denken. Indessen auch wenn sich in dieser Hinsicht ein merklicher Unterschied zwischen Stäbchen- und Zapfenleitungsbahn nicht nachweisen lassen sollte, ergäbe sich keine Schwierigkeit. Denn die Reaktionsgeschwindigkeit wie auch die Leitfähigkeit weist ja bei den verschiedenen Gewebsarten, auch den durch Erregbarkeit besonders ausgezeichneten, Unterschiede auf, welche die hier vorauszusetzenden noch übertreffen.

Ein Frage von besonderem Interesse ist es, worauf die verschiedene Erregbarkeit des Tages- und des Dämmerungsapparates den langwelligen Lichtern gegenüber beruhen mag, und wodurch überhaupt die ungleiche Verteilung der Reizwerte im Spektrum für die beiden Apparate bedingt sein kann. Man muß in dieser Hinsicht an die Möglichkeit denken, daß die Reizwerte, ähnlich wie photochemische Wirkungen, aus uns nicht bekannten Gründen von der Wellenlänge abhängen. Sicherlich ist dies auch in gewissem Umfang der Fall. Wissen wir doch überhaupt nicht, warum die sogenannten ultraroten Strahlen die Netzhaut unseres Auges nicht erregen, während sie auf gewisse niedere Organismen deutlich erregend wirken, und wissen wir doch ebensowenig, warum in dem fovealen Zapfenapparat gerade die Strahlen von der Wellenlänge 590—600 $\mu\mu$ die hellste Lichtempfindung auslösen, obwohl kein Absorbens in den Zapfen bekannt ist, das gerade diese Strahlen besonders stark absorbierte, und obwohl das Energiemaximum spektraler Strahlungen nicht in diesen, sondern in den grünen Lichtern liegt. Jedoch hat sich sogleich, als die Duplizitätstheorie aufgestellt und die Stäbchen als Organe des Dämmerungssehens in Anspruch

genommen wurden, die Aufmerksamkeit auf die sehr merkwürdigen Analogien gerichtet, die zwischen diesen und der chemischen Wirkung des Lichtes auf den Sehpurpur bestehen. Die Untersuchungen Kuehnes haben schon gezeigt, daß dieser durch gelbes Licht nur schwach, durch rotes so gut wie gar nicht affiziert wird. Über die genaueren quantitativen Verhältnisse ist an früherer Stelle berichtet. Es mag genügen hier anzuführen, daß nach den Ermittlungen von Köttgen und Abelsdorff die im Sehpurpur [absorbierten Energiemengen, nach den Untersuchungen von Trendelenburg auch die auf den Sehpurpur ausgeübten chemischen Wirkungen, die Bleichungswerte eine Abhängigkeit von der Wellenlänge zeigen, die mit derjenigen der Dämmerungs-

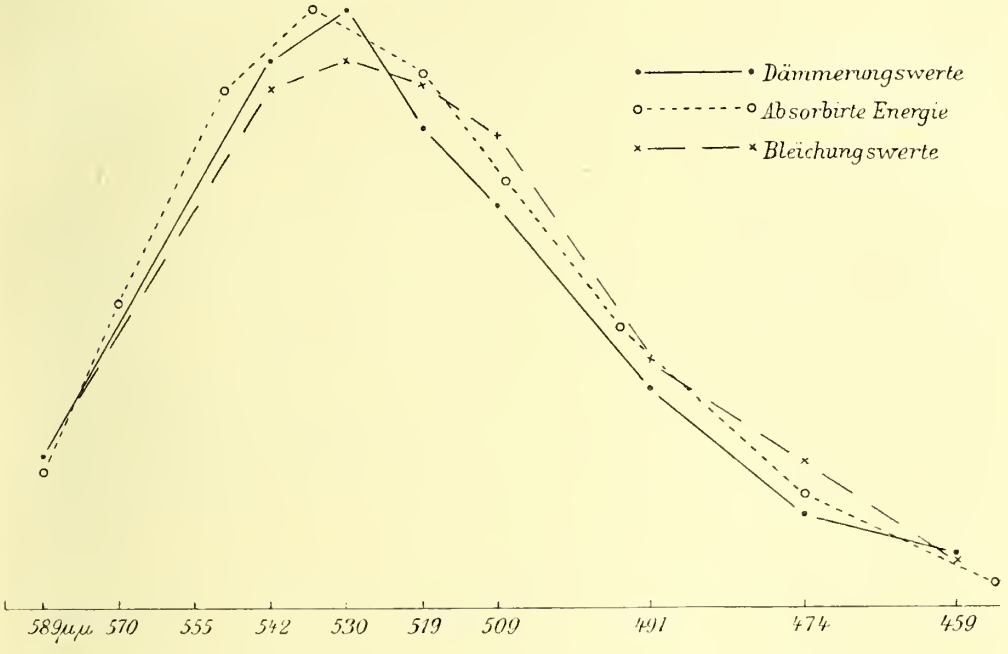



Fig. 72.

werte in höchst frappierender Weise übereinstimmt. Fig. 72 läßt dies in der üblichen graphischen Veranschaulichung erkennen.

Man wird kaum daran denken können hierin ein nur zufälliges Zusammentreffen zu erblicken. Vielmehr ist wohl daran nicht zu zweifeln, daß der Sehpurpur für das Dämmerungssehen von größter Bedeutung ist, und daß insbesondere die im Dunkel stattfindende Ansammlung des Sehpurpurs die wichtigste Grundlage der Dunkeladaptation darstellt. Welcher Art im speziellen seine Bedeutung ist und wie sie bzw. seine Zersetzung in dem ganzen Prozeß der Reizung des Auges durch Licht eingeht, das darf und muß dabei vorderhand dahingestellt bleiben.

Lassen die erwähnten Beobachtungen den engen Zusammenhang zwischen den optischen Eigenschaften des Sehpurpurs und der Reizwirkung der einzelnen Spektrallichter deutlich hervortreten, so gilt das fast noch mehr von einer Versuchsreihe, die v. Kries durch Stegmann hat ausführen lassen. Der Sehpurpur befindet sich in der Netzhaut bekanntlich in den Stäbchenaußengliedern, diese

in ihrer ganzen Länge färbend, also jedenfalls in einer Schicht von nicht zu vernachlässigender Dicke; das Licht, das die purpurhaltige Schicht durchsetzt, wird in den zuerst getroffenen Schichten eine partielle Absorption erleiden, und zwar werden diejenigen Strahlen am stärksten absorbiert, demgemäß also auch am meisten geschwächt werden, die gerade die stärkste Reizwirkung für die Stäbchen enthalten, nämlich die grünen Strahlen. Die Absorption ist um so beträchtlicher, je konzentrierter die „Lösung" des Purpurs in der Stäbchenschicht ist, (wenn der Ausdruck „Lösung" der Kürze wegen gestattet ist). Das Verhältnis der Erregungswirkungen zweier Lichter, eines stark absorbierten (grünen) und eines schwach absorbierten (z. B. orangefarbenen) zueinander, müßte also von der Menge des in der Stäbchenschicht enthaltenen Purpurs (seiner „Konzentration") bis zu einem gewissen Grade abhängig sein. Da nun erfahrungsgemäß mit länger dauerndem Lichtabschluß die Purpuransammlung in der Netzhaut merklich steigt, werden Gleichungen zweier Lichter, wie der oben genannten, die unter den Bedingungen des Dämmerungssehens eingestellt sind, im allgemeinen nicht unabhängig von der Dauer der vorausgegangenen Dunkeladaptation sein. In der Tat fanden Stegmann und ich in gemeinsamen Beobachtungen eine solche unverkennbare Abhängigkeit.

Stellten wir z. B. nach einem Lichtabschluß von 5 bis 15 Minuten Dauer „Dämmerungsgleichungen" zwischen spektralem Orange und Blaugrün ein (die natürlich beide farblos erscheinen mußten) und betrachteten diese Gleichung sodann mit demselben Auge, nachdem es noch erheblich längere Zeit vom Licht abgeschlossen gewesen war, so stimmte für dieses die Gleichung nicht: das längerwellige Licht (Orange) erschien heller als das kurzwellige und mußte auf etwa $^3/_4$ seiner vorherigen Intensität abgeschwächt werden. Dies ist also eine Änderung im umgekehrten Sinne, als sie dem Purkinjeschen Phänomen entsprechen würde, und sie geht in dem Sinne vor sich, wie es zu erwarten war, wenn die vermehrte Anhäufung des Sehpurpurs einen Einfluß auf die Erregungswirkung hat. Die Beobachtung beweist zugleich, daß der Ort des Angriffs des Lichtes im Stäbchen nicht, oder wenigstens nicht ausschließlich im Innenglied oder an der Grenze zwischen Innen- und Außenglied gelegen sein kann, sondern weiter außen liegen muß. Je weiter außen im Stäbchen der Ort der Erregung liegt, desto mehr muß sich ja die absorptive Wirkung des Sehpurpurs auf die Schwellenwerte geltend machen. Nicht zu folgern ist dagegen aus unserer Beobachtung, daß nur das äußerste Ende des Stäbchens Ort der Erregung wäre, sondern die Erregung kann ebensogut im gesamten Augenglied erfolgen.

Unter der Annahme, daß die typische angeborene totale Farbenblindheit (Achromatopie) als ein Sehen ohne Beteiligung des Tagesapparates (Zapfen) aufzufassen sei, ist zu erwarten, daß bei solchen Achromaten jener Unterschied zwischen Gleichungen, die mit purpurarmer und purpurreicher Netzhaut eingestellt sind, noch deutlicher bemerkbar macht. Ein Achromat kann im hellen Zimmer am Spektroskop Gleichungen zwischen Orange und Blaugrün einstellen, während die farbentüchtigen Beobachter schon einige Zeit dunkel adaptieren müssen, ehe sie einigermaßen genaue Einstellungen bekommen. In jenem Zustand der „Zimmeradaptation", die als Ausgangspunkt für die Beobachtung an Achromaten dienen kann, ist voraussichtlich die Purpurmenge wesentlich geringer.

Ich habe bei dem oben erwähnten totalfarbenblinden Mädchen derartige Versuche am Helmholtzschen Spektrophotometer angestellt. Das eine Auge

wurde längere Zeit lichtdicht verbunden, das andere immer im Zustand mittlerer Helladaptation gehalten. Nun stellte sie Gleichungen zwischen Orangegelb (600 $\mu\mu$) und Grünblau (490 $\mu\mu$) mit dem Hellauge an. Die Spaltweite für das Grünblau betrug 0,44 mm im Mittel (max. 0,49, min. 0,40). Nun beobachtete sie mit dem eine Stunde verbunden gewesenen Auge, wozu die Intensität beider Lichter natürlich proportional, durch einen Episkotister, bedeutend vermindert wurde. Die ersten Einstellungen nach Abnahme der Binde betrugen 0,85 und 0,8 mm, bei wiederholten Einstellungen kam sie auf niedrigere Zahlen, im Mittel 0,6 mm. Nachdem dieses Auge helladaptiert worden war, galten auch für dieses Auge die Werte zwischen 0,4 und 0,44, während für das inzwischen verbunden gewesene andere Auge (das zuerst Hellauge gewesen war) die Werte auf 0,55 bis 0,6 stiegen.

Aus der Tatsache, daß für grünblaues Licht und wie gleich hinzugefügt werden möge, für jedes grüne und blaue ebenfalls der Dämmerungswert niedriger gefunden wird, wenn das Auge lange Zeit verdunkelt war, als wenn nur eben die zur Einstellung der Gleichungen nötige Zeit im Dunkeln abgewartet wurde, erklärt sich das im Blau bemerkbare mäßige Auseinanderweichen der beiden oben auf S. 318 reproduzierten Kurven, deren eine die Dämmerungswerte eines normalen Auges wiedergibt und deren andere die Helligkeitsverteilung im Spektrum eines Totalfarbenblinden zeigt. Der nicht farbenblinde Beobachter hatte seine Netzhaut durch längeren Lichtabschluß weit purpurreicher gemacht, als diejenige des totalfarbenblinden Mädchens vermutlich sein konnte, das seine Einstellungen im hellen Zimmer machte. Der größere Purpurreichtum läßt den gefundenen Dämmerungswert der grünen und blauen Lichter, die stark absorbiert werden, niedriger ausfallen, als bei der Totalfarbenblinden.

Auch vergleichend physiologische Untersuchungen an Tieren mit verschieden stark entwickeltem Sehpurpurgehalt der Netzhaut bieten für die hier besprochenen Fragen viel interessantes. Wie schon oben erwähnt, hat sich M. Schultzes Angabe, wonach Tiere, die viel im Dunkeln leben, nur Stäbchen und keine Zapfen haben sollten, nicht in aller Strenge bestätigen lassen; richtig ist dagegen, daß bei ausgesprochenen Dunkeltieren, wie den Eulen, die Stäbchen ungewöhnlich groß und zahlreich, auch besonders reich an Pupur sind, während z. B. die Netzhäute der Tagraubvögel wenig oder gar keinen Sehpurpur aufweisen.

Funktionelle Verschiedenheiten konstatierte zuerst Abelsdorff, und zwar an der Pupillarreaktion bei Einwirkung verschiedenfarbigen Lichtes. Bei Tagtieren fand Abelsdorff die stärkste pupillenverengende Wirkung bei denjenigen Strahlen eines Spektrums, die auch für das helladaptierte Auge am hellsten aussehen, nämlich an der Grenze von Gelb und Orange, während bei Dunkeltieren das Maximum der pupillenverengenden Wirkung merklich gegen das Grün hin verschoben erscheint, ganz wie es dem subjektiven Helligkeitseindruck des dunkeladaptierten, purpurreicheren Auges entspricht.

Weit genauer, als die „pupillometrische" Wirksamkeit läßt sich die elektromotorische Wirkung der Lichter verschiedener Wellenlänge quantitativ vergleichen. In ähnlicher Weise, wie schon frühere Autoren[1] es taten, haben Himstedt und ich in gemeinsamen Versuchen die durch verschiedenfarbige Lichter bewirkten elektrischen Stromschwankungen im Froschauge bestimmt, jedoch zum erstenmal unter Berücksichtigung des Adaptationszustandes. Wir

[1] Vgl. hierüber den Zusatz S. 48.

bestimmten die Verteilung der elektromotorischen Wirksamkeit im Spektrum einmal am möglichst gut dunkeladaptierten Auge, sodann an Augen, die vorher hellem Tageslicht ausgesetzt waren. Wie man nach den Erfahrungen über die Adaptationswirkung beim menschlichen Auge erwarten konnte, bedurfte es für das Hellauge großer Lichtintensitäten, um meßbare Aktionsströme zu erzeugen, während für das Dunkelauge schon sehr geringe Intensitäten genügten; um den Dunkeladaptationszustand nicht zu zerstören, wurde daher auch dieser hohen Empfindlichkeit Rechnung getragen und mit möglichst geringen Lichtmengen gereizt. Aber auch die Abhängigkeit der Erfolge von der Wellenlänge ändert sich mit der Adaptation; das Maximum der Wirkung ist beim dunkeladaptierten Auge beträchtlich gegen das kurzwellige Ende verschoben.

H. Piper hat sodann auf meine Veranlassung quantitative Versuche über die Reizwirkung farbiger Lichter an anderen Tieren, einigen Warmblütern

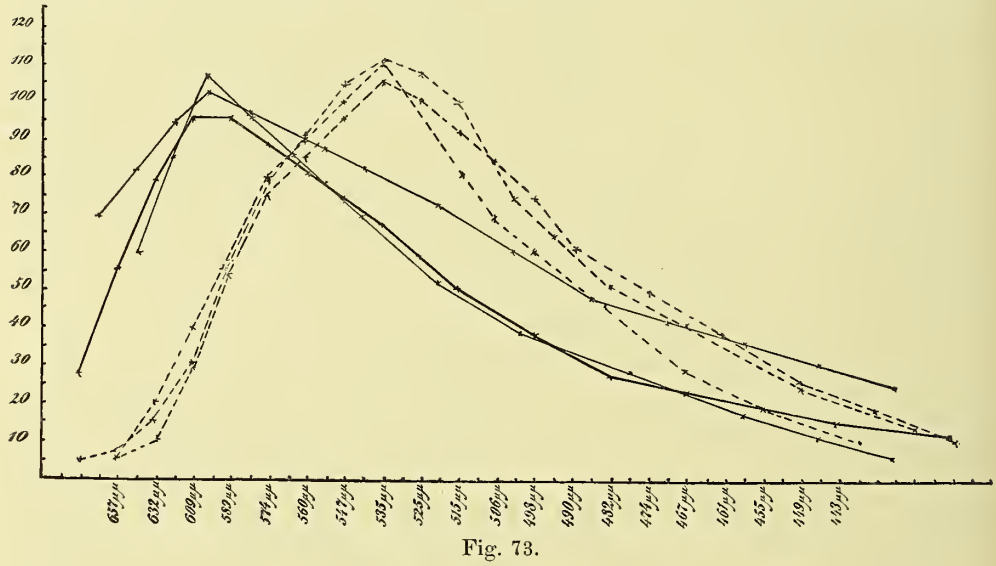



Fig. 73.

und einem Vertreter der Wirbellosen, einem Tintenfisch, angestellt. Besonders interessant sind hier wieder die vergleichenden Beobachtungen an Tagvögeln und Nachtvögeln. Fig. 73 veranschaulicht die Ergebnisse bei diesen Tieren. Von Tagvögeln kamen der Mäusebussard, das Haushuhn und die Taube zur Untersuchung, von Nachtvögeln Schleiereule, Waldkauz und Sumpfohreule. Man erkennt in der Figur sogleich das Auseinanderfallen der beiden Gruppen, besonders die ganz verschiedene Gipfellage. Innerhalb der einzelnen Gruppen besteht hinreichende Übereinstimmung, nur die eine Kurve, es ist die dem Mäusebussard zugehörige, unterscheidet sich von den übrigen Tagvögeln durch flacheren Abstieg nach dem kurzwelligen Spektralende hin.

Diese Tatsachen machen es jedenfalls wahrscheinlich, daß wir auch bei diesen Tieren die Zapfen als Organe des Tagessehens, die Stäbchen als Organe des Dämmerungssehens auffassen dürfen, und daß beide sich den entsprechenden Gebilden des menschlichen Sehorganes namentlich in bezug auf die Reizwerte der verschiedenen Lichter gleichartig oder wenigstens ähnlich verhalten.[1]

[1] Die Verhältnisse bedürfen übrigens in mancher Hinsicht noch weiterer Klärung. So ist es auffällig, daß Piper Änderungen in der Verteilung der Reizwirkungen durch die

Eine letzte Gruppe objektiv nachweisbarer Veränderungen in der Netzhaut, die ebenso wie der Sehpurpurgehalt und die elektromotorische Wirksamkeit in unverkennbarer Weise von dem Adaptationszustand abhängig sind, d. h. Unterschiede zwischen einer belichteten und einer nicht belichteten Netzhaut darbieten, sind durch die Verschiebungen des Pigments im Pigmentepithel der Netzhaut und durch die Bewegungen der Zapfen gegeben. Es liegt nahe, diese beiden Vorgänge miteinander in Verbindung zu bringen, wie es Herzog und Exner und Januschke getan haben. Nach der Auffassung dieser Autoren liegt hier ein Aus- und Einschaltungsmechanismus für die zwei in der Netzhaut vereinigten Apparate, den Dämmerungs- und den Tagesapparat, vor. Bei schwachem Licht oder in völliger Dunkelheit tritt das Pigment in die Zellkörper zurück und gibt den Zwischenraum zwischen den einzelnen Stäbchen frei. Es ist nicht unmöglich, daß unter diesen Umständen beim Einfall einer geringen Lichtmenge durch die Pupille der das einzelne Stäbchen treffende Anteil an der Lichtmenge größer ist, infolge von Diffussion) des Lichtes in der ganzen Netzhaut), als wenn die Stäbchen durch eine dichte Pigmenthülle voneinander isoliert sind, in welchem Falle nur dasjenige Licht in das Stäbchen eindringen kann, das in der Längsrichtung des Stäbchens die Netzhaut passiert. Die Zapfen, die im Dämmerungssehen größtenteils zwischen die Stäbchen vorgeschoben liegen, bleiben, wie anzunehmen wäre, außer Funktion, weil die geringe einwirkende Lichtmenge noch nicht die Schwelle der Erregungswirkung für den Zapfenapparat überschreitet.

Wenn andererseits bei starkem Licht, also unter den Bedingungen des Tagessehens das Pigment vorwandert, wird von dem durch die Anhäufung des Sehpurpurs im Dunkeln hochgradig lichtempfindlich gemachten Stäbchenapparat eine übermäßig große Lichtmenge ferngehalten und eine allmählichere Anpassung an die größere Lichtintensität ermöglicht, während die weniger lichtempfindlichen Zapfen der Pigmentumhüllung entzogen werden und den stärkeren Reizen sich frei aussetzen.

Wenngleich eine solche Auffassung der Bewegungsvorgänge in der Netzhaut etwas Bestechendes hat, so ist doch nicht zu verkennen, daß ihr eine Anzahl nicht geringer Bedenken entgegenstehen; ich habe sie mir daher schon in meiner früheren zusammenfassenden Darstellung der objektiven Netzhautveränderungen im Handbuch der Physiologie des Menschen, Bd. III. S. 92 nicht zu eigen machen können und kann dies jetzt um so weniger, als Garten in seiner ausführlichen Bearbeitung des betreffenden Gebiets in Graefe-Sämischs Handbuch der Augenheilkunde (2. Aufl. III. Bd.) für die Herzog-Exnersche Hypothese auch überwiegend nur ungünstige Argumente beizubringen vermochte. Verhältnismäßig noch am wenigsten schwerwiegend erscheint mir der Umstand, daß Pigment- und Zapfenverschiebungen in ausgiebiger Weise nur bei Kaltblütern und Vögeln, nicht aber beim Menschen und bei höheren Säugetieren konstatiert werden konnten. Der mangelnde Nachweis dieser Vorgänge beim menschlichen Auge beweist nicht ihr Fehlen, da hier möglicherweise die Prozesse schneller ablaufen als beim Kaltblüter. Auch bei Affen wurde ja von Hess vergeblich nach Pigmentverschiebungen gesucht,

Adaptation bei Kaninchen, Katzen und auch Hunden vermißte. Weniger kann es überraschen, daß nach den Beobachtungen von Hess auch Hühner durch Adaptation eine Verschiebung der Helligkeitsverhältnisse zugunsten der kurzwelligen Lichter zeigen, da ihre Netzhäute wohl schwerlich ganz frei von Sehpurpur sind.

während Garten mit verbesserter Methodik solche, allerdings von geringem Umfange nachweisen konnte. Aber selbst wenn es sich überzeugend zeigen ließe, daß im menschlichen Auge die phototropischen Reaktionen des Pigmentepithels fehlen, läge darin kein Grund dagegen, die Vorgänge im Frosch, Fisch und Vogelauge in der angegebenen Weise zu erklären und anzunehmen, daß der gleiche Zweck, die Adaptation des Auges an verschiedene Lichtstärken, beim Säugerauge auf andere Weise erreicht wird. Vollzieht sich doch auch der Akkommodationsakt bei den verschiedenen Tierklassen in grundverschiedener Weise.

Es gibt aber andere Bedenken gegen die Ein- und Ausschaltungshypothese. Es ist z. B. nicht recht einzusehen, was die Verlängerung der Zapfen bei Verdunkelung für einen Zweck hat. Warum bleiben nicht alle, wie es doch ein Teil der Zapfen tut, unbeweglich an der Membrana limitans sitzen? Was für einen Zweck hat das Pigment in der stäbchenfreien Region des menschlichen Auges? Wie ist es zu verstehen, daß in einem großen Teil der Netzhaut beim Hund, der Katze und anderen Tieren, die ein Tapetum haben, das Pigment ganz fehlt?

Da wir auf diese Fragen vorläufig die Antwort schuldig bleiben müssen, kann von einer abgeschlossenen Theorie der Bewegungsvorgänge in der Netzhaut zurzeit noch nicht die Rede sein. Als sehr wahrscheinlich kann gelten, daß der Vorgang der Hell- und Dunkeladaptation nicht fest an das Vorhandensein phototropischer Bewegungen von Netzhautelementen gebunden ist, daß diese Bewegungen aber unter Umständen bei dem Adaptationsprozeß mit beteiligt sein können, dessen wesentlichste Grundlage in der Sehpurpurbildung bzw. Bleichung gegeben ist.

Daß das Pigment als solches mit der Sehpurpurbildung etwas zu tun habe, ist nicht wahrscheinlich, da auch bei pigmentlosen Albinos und in den pigmentfreien Teilen der Katzennetzhaut reichlicher Purpur nachzuweisen ist. Die Bedeutung des Pigments wird vielmehr eine rein optische sein und in der Verhütung seitlicher Diffusion des Lichtes in der Stäbchenschicht liegen. Unklar bleibt aber, wie gesagt, warum bei einem Teil der Tiere dieser Schutzapparat so deutlich sichtbare Reaktionen auf Licht zeigt, bei anderen dagegen nicht.

# Zusätze von v. Kries.

## I. Normale und anomale Farbensysteme.

### 1. Gesetze der Lichtmischung.

Die Anschauungen, die Helmholtz seinerzeit über die Natur der Gesichtsempfindungen, ihre Entstehung und die ihnen zugrundeliegende Einrichtung des Sehorgans entwickelte, haben, wie in dem vorstehenden Zusatzkapitel dargelegt worden ist, in neuerer Zeit namentlich insofern eine Modifikation erfahren, als wir veranlaßt sind, in dem Dämmerungssehen eine besondere, vermutlich auch auf einen gesonderten Bestandteil des Sehorgans zurückzuführende Art des Sehens anzunehmen. Die ihm gegenüberzustellende als Tagessehen bezeichnete Funktionsweise, die wir mit Annäherung durch hochgradige Helladaptation, ganz streng vermutlich auf einem kleinen, der Fovea centralis angehörigen Bezirk, zur Beobachtung bekommen, ist bei den älteren Helmholtzschen Untersuchungen überwiegend zur Geltung gekommen. Auch in bezug auf diese jedoch sind unsere Kenntnisse durch spätere Beobachtungen erheblich vervollständigt worden. Ermöglicht wurde dies vorzugsweise durch eine vervollkommnete Methodik, die die zunächst nur qualitativ ermittelten Gesetze der Lichtmischung für normale und für verschiedene Arten anomaler Sehorgane quantitativ zu fixieren gestattete.

Die sehr zahlreichen, namentlich für die Mischung reiner (spektraler) Lichter im Laufe der letzten Jahrzehnte konstruierten Vorrichtungen können hier nicht vollständig besprochen werden. Es wird genügen anzuführen, daß sie sich, soweit sie für subjektive Beobachtung bestimmt sind, fast durchgängig einem (soweit ich feststellen kann) zuerst von Maxwell[1] eingeführten Prinzip anschließen. Dies besteht darin, daß nicht objektive Spektra betrachtet werden, sondern das Auge des Beobachters sich unmittelbar hinter den reellen Spektren befindet, von denen ein Okularspalt einen kleinen Bezirk ausschneidet. Der Beobachter sieht unter diesen Umständen nicht das Spektrum mit seinen von Stelle zu Stelle sich ändernden Farbentönen, sondern die Fläche der Objektivlinse als ein in allen Teilen durch Licht von derselben Wellenlänge erleuchtetes, somit ganz gleichmäßig erscheinendes Feld. Ich beschränke mich darauf, hier eine etwas genauere Besprechung des von Helmholtz selbst angegebenen Apparates nach der zweiten Auflage dieses Werkes zu geben. Es ist der gleiche, dessen sich, wenn auch mit mancherlei Modifikationen, König, ich und Nagel in der

[1] Philos. Transactions **150**, S. 57, 1860.

Hauptsache bedient haben. Er ist in horizontalem Schnitt in Fig. 74 abgebildet. „Darin ist *P* ein großes gleichseitiges Prisma, welches auf dem zentralen schweren Füße des Instrumentes unverrückbar befestigt ist. *B* und *C* sind zwei um eine unter *P* liegende senkrechte Achse drehbare Kollimatoren, aus denen das zu mischende Licht auf das Prisma *P* fällt. Das von *B* kommende Licht tritt durch die rechte Fläche des Prismas, das von *C* kommende durch die linke aus, und

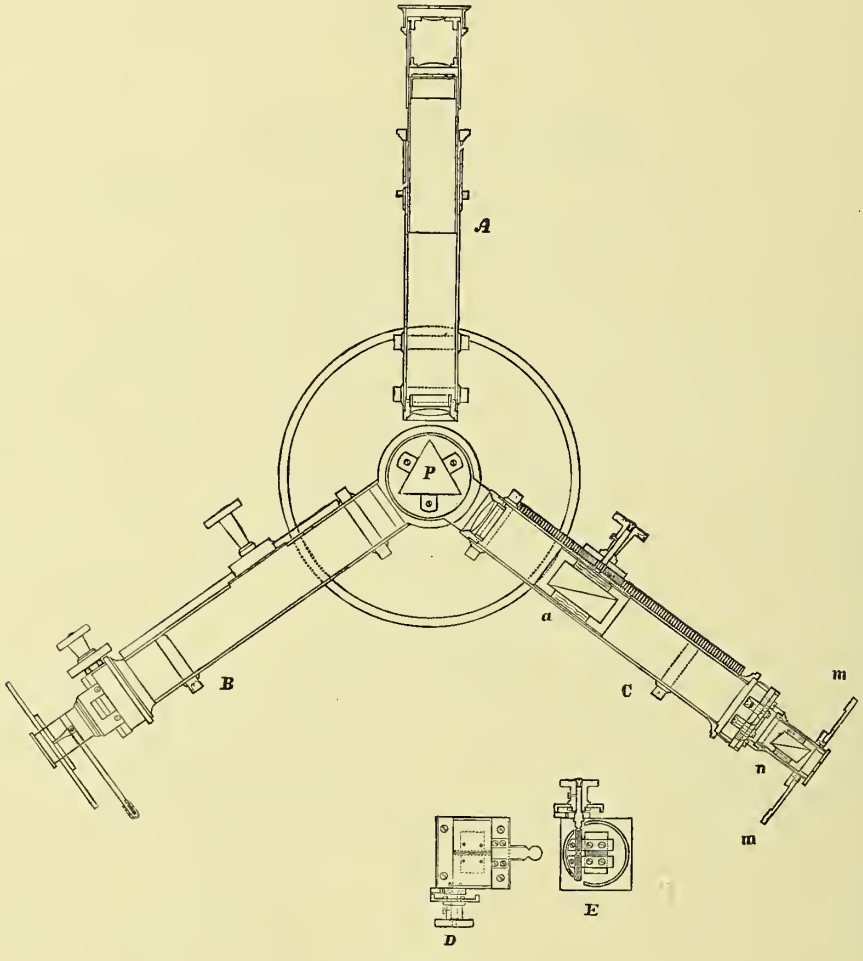



Fig. 74.

der Beobachter, dessen Auge sich bei *A* befindet, sieht also das aus dem rechten Fernrohre herrührende Licht durch die linke Seite des Prismas auftauchen und umgekehrt. Für die Beobachtungen der Farbengemische wird das Okular des Fernrohrs entfernt; statt dessen bleibt nur ein rechteckiger schmaler Spalt an der Stelle des Brennpunktes des Objektives stehen, dessen Breite durch Schrauben verändert werden kann. Zwei andere feinere Spalten, deren Breite an dem Kopf der sie verengernden und erweiternden Mikrometerschraube abgelesen werden kann, befinden sich an den Enden der Rohre *B* und *C*. Bei den Verengerungen und Erweiterungen dieser drei Spalten kommt es darauf

an, daß deren Mittellinie festgehalten werde, damit sich nur die Helligkeit, aber nicht die Farbe des Bildes ändere, und deshalb werden ihre beiden Schneiden durch Drehung derselben Schraube gleichviel in entgegengesetzter Richtung bewegt. In Fig. *D* und *E* sind die Einrichtungen dieser Spalte skizziert. Um nun aus jedem der beiden Kollimatoren *B* und *C* je zwei Farben zur Vereinigung zu bringen, befindet sich im Innern beider Röhren ein doppelbrechendes Prisma von Kalkspat *a* der Fig. 74, welches mit einem Glasprisma so verbunden ist, daß die mittlere Richtung, in der man die beiden Bilder sieht, nicht abgelenkt wird. Die Strahlen, welche durch diese Prismen hindurch gegangen sind, verhalten sich bei ihren weiteren Brechungen, als kämen sie von zwei getrennten Bildern jedes Spaltes her, die um so weiter auseinander liegen, je entfernter das Prisma vom Spalte ist. Jeder der beiden Doppelspate kann mittels eines Triebs, der in eine Zahnstange eingreift, hin- und hergeschoben werden. Zu dem Ende sind die beiden Röhren *B* und *C* seitlich aufgeschnitten, so daß das Prisma *a* mit seinem Trieb frei hin und hergleiten kann. Die beiden Strahlenbündel aber, welche diesen beiden Bildern entsprechen, sind rechtwinklig zueinander polarisiert. Setzt man also vor jeden Spalt noch ein Nicolsches Prisma *n*, welches drehbar ist, so kann man das Verhältnis beider Lichtbündel beliebig ändern, oder sogar eins der Bilder ganz auslöschen, wobei das andere seine größte Intensität erhält. Die Größe der Drehung wird mittels zweier geteilter Kreise *m m* gemessen, welche an den Röhrenstücken befestigt sind, die die Nicols enthalten.

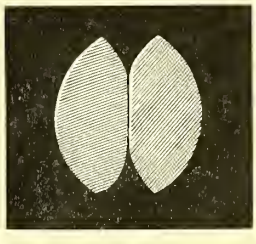


Fig. 75.

Das Prisma *P* entwickelt nun jedes der beiden Spaltbilder in ein Spektrum. Die beiden Spektren sind aber, entsprechend der scheinbaren Distanz der beiden Spaltbilder, mehr oder weniger gegeneinander verschoben, so daß verschiedene Farbenpaare darin zur Deckung kommen. Die Objektivlinse des Fernrohrs *A* entwirft endlich ein objektives Bild dieser beiden Spektrenpaare in der Ebene des Spaltes, der in ihrem Brennpunkt steht, und es geht also an jeder Seite des Prismas hier Licht der beiden Farben durch diesen Querspalt, deren Strahlen in dem Spalt vereinigt werden. Man sieht also schließlich, durch diesen Spalt nach dem Prisma hinblickend, ein Feld von der Form Fig. 75. Die feine mittlere Trennungslinie entspricht der vorderen Kante des Prismas *P*, die kreisförmige seitliche Umgrenzung dem Umfange der Objektivlinse von *A*, die kleinen Bogenstücke den Grenzen der Objektivlinsen von *B* und *C*. Man kann nunmehr die Färbung und Helligkeit der beiden Felder vergleichen und sie gleich zu machen suchen, wenn sie es noch nicht sind, und so eine Farbengleichung herstellen.

In jeder der Mischfarben kann man durch Drehung des entsprechenden Rohres *B* oder *C* beide Farben gleichzeitig dem Rot oder dem Violett nähern; dagegen durch Vorwärtsschiebung des Doppelspates *a* die eine gegen das Rot, die andere zum Violett wandern machen. Die Intensität der Komponenten ändert man in genau meßbarer Weise durch Drehen des Nicols *n*, das Helligkeitsverhältnis beider Paare dagegen durch Änderungen der Spaltbreite zu Ende von *B* oder *C*.

Um die Wellenlänge zu bestimmen, wurde die Okularlinse von *A* eingesetzt. Dann sieht man bei Anwendung von Sonnenlicht im Okularspalt die Fraun-

HOFERschen Linien der vier Spektren erscheinen, die man auch einzeln abblenden kann. Da die Wellenlängen auch der feineren Linien genau bekannt sind, so kann man in dieser Weise bestimmen, welche Wellenlänge den vier mittleren Farben des Spaltes zukommt."

Für wissenschaftliche Beobachtungen und Messungen geeignet sind ferner die Einrichtungen von v. FREY und v. KRIES (Archiv f. Anat. u. Physiologie. Physiolog. Abt. 1881 S. 336), ein von ASHER angegebener Apparat (Verhandlungen der Deutschen Physikal. Gesellschaft V, 1903) und ein von HERING erwähnter, aber soweit mir bekannt nirgend des genaueren beschriebener (PFLÜGERS Arch. **54** S, 312, 1893).

Für Demonstrationszwecke sind Vorrichtungen zum Mischen reiner Farben beschrieben worden von ZOTH (PFLÜGERS Arch. **70** S. 1, 1898), SCHENCK, Sitzungsber. d. Marburger Gesellschaft zur Bef. der ges. Naturw. 1907), BASLER (PFLÜGERS Arch. **116** S. 628, 1907), SAMOJLOFF (Ztschr. f. Physiol. d. Sinnesorgane **43** S. 237, 1909) und KROGH (Skandinav. Archiv f. Physiologie **18** S. 320, 1906). Eine einfache, für den praktischen Unterricht bestimmte Anordnung habe ich (Ztschr. für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane **43** S. 59, 1909) angegeben. Einige für praktische Untersuchungszwecke bestimmte Apparate sind an späterer Stelle noch zu erwähnen.

Was die durch diese Untersuchungen gewonnenen Ergebnisse anlangt, so empfiehlt es sich, diejenigen, die sich auf normale, und diejenigen, die sich auf dichromatische Farbensysteme beziehen, sogleich zusammenzufassen. Es haben sich nämlich vor allem zwei Tatsachen von allgemeinerer Bedeutung und großer Tragweite herausgestellt. Die erste ist die, daß die Personen mit typisch dichromatischen Farbensystemen (für die also nach der HELMHOLTZschen Darstellung die Farbentafel in eine gerade Linie zusammengeschrumpft wäre) in zwei voneinander streng geschiedene Typen zerfallen. Zwischen den Sehweisen dieser beiden Typen bestehen Unterschiede, die sicher nicht auf rein physikalischen Ursachen, wie etwa einer stärkeren oder schwächeren Gelbfärbung der Augenmedien beruhen können, während innerhalb jedes einzelnen Typus individuelle Unterschiede nicht sehr erheblichen Betrages und wahrscheinlich solchen physikalischen Ursprungs vorhanden sind.

Die zweite besteht darin, daß die Dichromaten (beider Typen) die Mischungsgleichungen farbentüchtiger Personen als auch für sie zutreffend anerkennen. Objektiv ungleiche Lichtgemische, die den Farbentüchtigen gleich erscheinen, erscheinen also auch den Dichromaten gleich. Auch dies gilt, wenn man von den eben erwähnten, vermutlich physikalisch zu erklärenden Unterschieden absieht, Unterschieden, wie sie ähnlich auch innerhalb der farbentüchtigen Personen vorkommen.

Was die erstere dieser Tatsachen anlangt, so ist sie keine andere als die, die auch schon früher, besonders in der für einen Teil der Dichromaten bestehenden Verkürzung des Spektrums am roten Ende bemerkt worden ist. Sie drückt sich jedoch weit schärfer in dem ungleichen Helligkeitsverhältnis zweier der langwelligen Hälfte des Spektrums angehörigen Lichter aus. Man kann diese so wählen, daß alle typischen Dichromaten zwischen ihnen bei bestimmten Stärkeverhältnissen richtige Gleichungen erhalten; aber die Stärkeverhältnisse müssen für die der einen und der anderen Klasse zugehörigen ganz verschieden sein. Ich habe für diese Prüfungen das rote Licht von der Wellenlänge 671 $\mu\mu$ (Lithiumlinie) und das gelbe von 589 $\mu\mu$ verwendet. Die von 20 Dichromaten erhaltenen Ergebnisse zeigt die nachstehende Tabelle.[1]

[1] v. KRIES Zeitschrift für Psychologie usw. **13**, S. 259.

Menge des einem bestimmten Gelb gleich erscheinenden Rot.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1. | W. N. | 36,5 | F. | 214 |
| | | 36,3 | V. | 213 |
| | | 36,3 | M. Sc. | 211 |
| | | 33,5 | E. J. | 205 |
| | | 38,4 | H. | 196 |
| 2. | L. V. | 37,3 | E. I | 198 |
| 3. | A. V. | 37,0 | E. II | 210 |
| 4. | Sc. En. | 37,0 | K. | 200 |
| 5. | O. N. | 37,8 | W. | 210 |
| 6. | K. Th. | 37,0 | B. | 203 |
| 7. | H. Th. | 36,9 | Th. | 225 |
| 8. | O. Th. | 38,0 | | |
| 9. | F. | 40,0 | | |

Es zeigt sich hier, daß die beiden Typen in der Tat scharf voneinander verschieden sind, dagegen innerhalb der einzelnen Klassen eine sehr annähernde Übereinstimmung besteht.

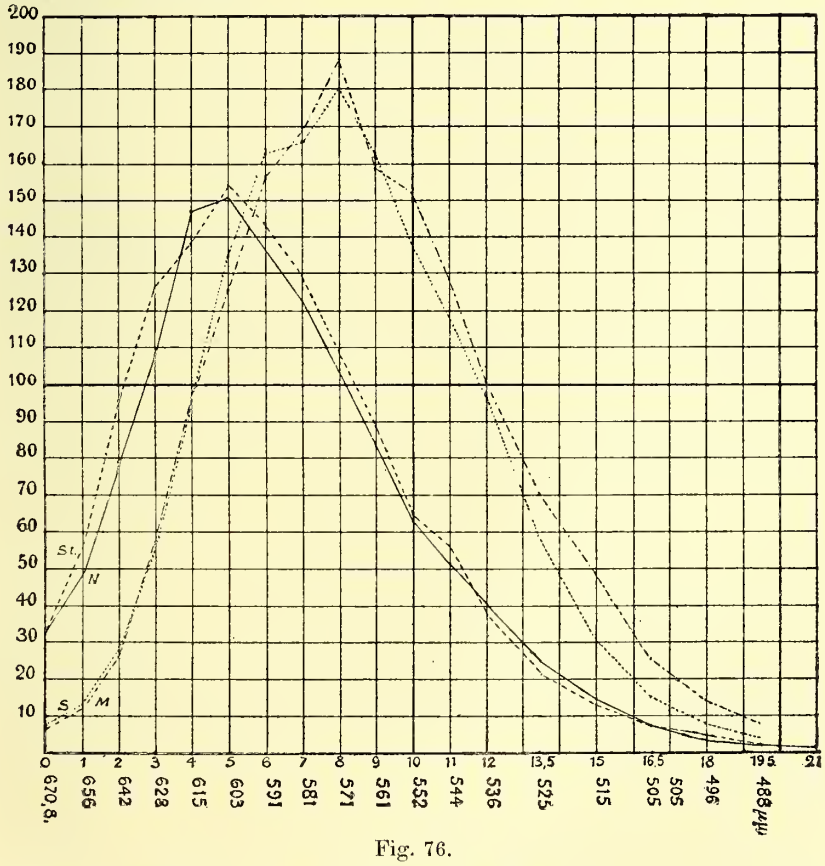



Fig. 76.

Zu einer detaillierten und vollständigen Festlegung der Sehweise des einzelnen Dichromaten gelangt man mittels einer systematischen Durchführung der Mischungsbeobachtungen, die ich als Eichung eines Spektrums bezeichnet habe. Es wird zu diesem Zwecke so verfahren, daß das eine

Feld des Farbenmischapparates mit der Mischung eines lang- und eines kurzwelligen Lichtes erleuchtet wird, während das andere aus seinem Kollimator ein einfaches Licht erhält. Im letzteren Felde wird sukzessive eine Reihe einfacher Lichter eingestellt und für jedes die ihm gleich erscheinende Mischung roten und blauen Lichtes im Nachbarfelde hergestellt. Man erhält so für jedes reine Licht die Rot- und die Blauquantitäten des ihm gleich erscheinenden Gemisches. Die Rotwerte für je zwei Dichromaten des einen und anderen Typus sind in Fig. 76, die Blauwerte in Fig. 77 veranschaulicht.[1]

Man bemerkt, wie die ersteren für die beiden Typen scharf auseinander fallen, die letzteren dagegen einen charakteristischen Unterschied nicht erkennen lassen.

Die zweite der erwähnten Tatsachen würde sich in ganz strenger und allgemeiner Weise rechnerisch erweisen lassen, wenn wir eine ähnliche Eichung eines Spektrums auch für farbentüchtige Sehorgane durchführen könnten. Dies ist bis jetzt nur für die weniger brechbare Hälfte des Spektrums ausgeführt

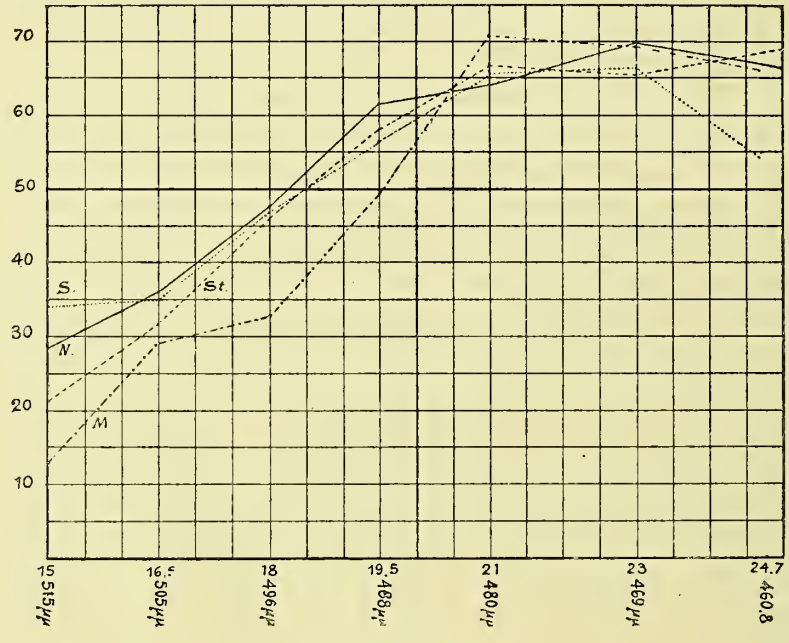



Fig. 77.

worden. Innerhalb dieser kann der Trichromat aus zwei Endlichtern Gemische herstellen, die den Lichtern einer dazwischen liegenden Wellenlänge gleich aussehen. Dieser Teil des Spektrums kann also mit Benutzung zweier Standardlichter geeicht werden und eine solche Eichung gestattet dann ohne weiteres die Verteilung der Reizwerte für die Dichromaten zu berechnen, wenn man berücksichtigt, daß das gelbgrüne Licht für die eine Klasse der Dichromaten etwa den 20fachen, für die andere etwa den doppelten Reizwert von dem des roten besitzt. Die so berechnete Verteilung stimmt mit der für den Dichromaten direkt gefundenen sehr befriedigend überein, wie dies die Tabelle auf folgender Seite erkennen läßt.

[1] Die numerischen Angaben s. a. a. O. S. 252 sowie in Nagels Handbuch der Physiologie 3, S. 153.

Hierin drückt sich also allgemein rechnerisch aus, was auch die Prüfung einzelner Gleichungen immer bestätigt, daß die von den Farbentüchtigen eingestellten Mischungsgleichungen in der Tat für beide Dichromaten zutreffen.[1]

| Wellenlänge des homogenen Lichtes | Menge der Lichter 670,8 und 552 $\mu\mu$ im Gemisch | | Reizwert für das Sehorgan des Grünblinden | | Reizwert für das Sehorgan des Rotblinden | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 670,8 | 552 | berechnet | beobachtet | berechnet | beobachtet |
| 0 (670,8) | 88,5 | — | 33 | 33 | 4,9 | 4,9 |
| 3 (628 $\mu\mu$) | 251 | 10,0 | 106 | 107 | 28,8 | 38,5 |
| 4 (615 $\mu\mu$) | 276 | 27 | 126 | 147 | 54,2 | 63 |
| 5 (603 $\mu\mu$) | 270 | 49 | 145 | 151 | 86 | 84 |
| 6 (591 $\mu\mu$) | 202 | 67 | 135 | 137 | 108 | 105 |
| 7 (581 $\mu\mu$) | 123 | 76 | 114 | 124 | 117 | 113 |
| 8 (571 $\mu\mu$) | 73 | 91 | 110 | 103 | 137 | 126 |
| 9 (561 $\mu\mu$) | 21 | 80 | 76 | 82 | 111 | 106 |
| 10 (552 $\mu\mu$) | — | 71 | 64 | 64 | 101 | 101 |

Um einen ähnlichen Vergleich in vollem Umfang durchzuführen, müßte, wie gesagt, eine Eichung des ganzen Spektrums für den Farbentüchtigen ausgeführt werden. Hierzu würden drei Eichlichter und demgemäß noch erheblich verwickeltere technische Hilfsmittel erforderlich sein. Beobachtungen dieser Art sind bis jetzt nicht ausgeführt worden. Sind wir demgemäß allerdings nicht in der Lage, den obigen Satz durch eine systematische Untersuchung zu erweisen, so ist es doch leicht, ihn durch sehr zahlreiche und mannigfaltige Einzelversuche zu prüfen, und ich habe ihn dabei stets bestätigt gefunden. Die Modifikationen, die etwa der Dichromat an irgend einer, von einem Farbentüchtigen eingestellten Gleichung verlangt, um sie für ihn zutreffend zu machen, sind meist sehr geringfügig und von der Art, wie sie auch innerhalb derselben Klasse vorkommen und auf physikalische Ursachen bezogen werden können.

Das hierdurch festgelegte und experimentell erwiesene Verhältnis der dichromatischen Systeme untereinander, sowie beider zu den normalen trichromatischen ist nun kein anderes als dasjenige, dessen Bestehen auch von Helmholtz schon als wahrscheinlich angenommen worden war. Um dafür eine lediglich die Beobachtungsergebnisse ausdrückende, keinerlei theoretische Folgerung involvierende Bezeichnung zu haben, habe ich die beiden dichromatischen Farbensysteme als Reduktionsformen des normalen bezeichnet. Ihre jedenfalls nächstliegende und einfachste theoretische Deutung wird die sein, daß es sich um Ausfallserscheinungen handelt, und zwar den einen der eine, den anderen ein anderer von den in der Helmholtzschen Theorie angenommenen Bestandteilen des Sehorgans fehlt. Eben dies ist auch schon in der alten Übung von Rot- und Grünblinden zu sprechen, zutreffend zum Ausdruck gekommen. Doch haben diese Ausdrücke den Anlaß zu zahlreichen Mißverständnissen gegeben, die durch den Wortlaut einigermaßen nahe gelegt sind. In der Tat ist weder der Grünblinde für grünes Licht, der Rotblinde für rotes Licht wirklich blind, noch darf man annehmen, daß jenen die Grün- oder diesen die Rot-

[1] Man kann diesen Satz in besonders anschaulicher Weise auch dadurch erweisen, daß Gleichungen zwischen einem homogenen Gelb und Rot-Grün-Gemischen dann, und nur dann für Dichromaten beider Typen zutreffen, wenn das Verhältnis von Rot und Grün so gewählt wird, daß das Gemisch für den Normalen mit dem reinen Gelb farbengleich ist (s. Ztschr. für Psychologie usw. **13**, S. 277).

empfindung fehle.[1] Um Bezeichnungen zu haben, die das hier festgestellte Verhältnis kurz und mit möglichst wenig theoretischer Präsumtion zum Ausdruck bringen, habe ich daher vorgeschlagen, die beiden Gruppen der Dichromaten Protanopen und Deuteranopen zu nennen (Personen, die eines ersten bzw. zweiten Bestandteils des normalen Sehorgans ermangeln).

Gehen wir von der, dem Gesagten zufolge wohlbegründeten Annahme aus, daß Lichtgemische, die den beiden Dichromatengruppen gleich erscheinen, auch für den Trichromaten übereinstimmen, so gestattet uns dies, die für diesen geltenden Gesetze der Lichtmischung in der Form einer Farbentafel zur Anschauung zu bringen, und zwar nicht nur, wie dies schon früher möglich und geschehen war (s. o. S. 117), in einer qualitativ zutreffenden, sondern in einer auch quantitativ den Beobachtungen entsprechenden Weise. Eine solche Farbentafel habe ich auf Grund der erwähnten Dichromatenbeobachtungen konstruiert.[2]

Auch für die Art, wie die einzelnen Bestandteile des Sehorgans von den verschiedenen Lichtern affiziert werden, ergeben sich hieraus bestimmte Anhaltspunkte. Man pflegt die Stärke der Wirkung eines Lichtes auf einen Teil des Sehorgans mit einem von Hering eingeführten Worte eine Valenz zu nennen. Wir bezeichnen anderseits als Eichwerte die Mengen eines jeden der drei Eichlichter in dem den betr. homogenen Lichte gleich erscheinenden Gemisch. Eichwertkurven bzw. Valenzkurven nennt man Kurven, die in der üblichen Weise durch ihre Ordinatenhöhen die einen und andern Werte als Funktionen der Wellenlänge für ein bestimmtes Spektrum anzeigen.

Eine einfache Betrachtung ergibt nun[3], daß die Blauvalenzen (die Reizwerte für den Blaubestandteil des Auges) in gleicher Weise wie die gefundenen Blauwerte von der Wellenlänge des Lichtes abhängen, während die Valenzen für den ersten und zweiten Bestandteil irgendwelche lineare Funktionen der gefundenen Mengen langwelligen Lichtes sind.

Während die Sehweise der beiden besprochenen Gruppen von Dichromaten bei der Häufigkeit ihres Vorkommens und der typischen Gleichartigkeit der Erscheinungen leicht zu untersuchen und auch in befriedigender Weise aufgeklärt ist, sind unsere Kenntnisse immer noch ziemlich dürftig mit Bezug auf eine dritte Art von Anomalien, die man als Blaublindheiten oder Gelbblaublindheiten zu bezeichnen berechtigt ist. Es ist in bezug auf diese Störungen bemerkenswert, daß sie sehr selten angeboren vorzukommen scheinen, häufiger dagegen als erworbene, durch mancherlei Erkrankungen des Auges, namentlich Netzhautablösung bewirkt, zur Beobachtung kommen. In diesen Fällen ist dann die Störung natürlich meist einseitig, oft auch auf bestimmte Teile des Gesichtsfeldes beschränkt.

Um erworbene Störungen handelte es sich in fünf von König[4] untersuchten und beschriebenen Fällen. Diesen Personen erschien sowohl ein Gelb (566—570 $\mu\mu$) wie ein zu diesem etwa komplementäres Blau mit gemischtem farblosen Licht übereinstimmend. Auch die speziellen Untersuchungen mit einer Reihe optischer

[1] Auch darf aus der Annahme, daß den Dichromaten je ein Bestandteil des Sehorgans fehle, keineswegs der Schluß gezogen werden, daß das gemischte, für den normalen farblose Tageslicht von den einen blaugrün und von den andern purpurfarben gesehen werden.

[2] Nagels Handbuch der Physiologie. 3. S. 162. Auf gewisse Eigentümlichkeiten in der Form dieser Farbentafel kommen wir unten noch zurück.

[3] s. Nagels Handbuch der Physiologie. 3. S. 163.

[4] Sitzungsberichte der Berliner Akademie. 1897.

Gleichungen stellten heraus, daß es sich um eine Reduktionsform des normalen Systems handelte. Die Erscheinungen stimmen also mit dem überein, was im Sinne der Helmholtzschen Theorie bei Fehlen der Blaukomponente erwartet werden darf, und die Anomalie kann demgemäß im Anschluß an die obigen Bezeichnungen als Tritanopie benannt werden.

Einige weitere Fälle von erworbenen einseitigen Anomalien jedenfalls sehr ähnlicher Art sind von Collin und Nagel[1] beschrieben.

In einem von Vintschgau[2] und Hering[3] beschriebenen Falle war die Anomalie beiderseitig und angeboren. Auch hier erschienen gelbe und blaue Lichter mit unzerlegtem Weiß übereinstimmend. Doch wurden auch erhebliche Abweichungen gegen Rot oder Grün nicht bemerkt, so daß der Zustand sich einer totalen Farbenblindheit einigermaßen annäherte.

Als weitere Fälle seien hier noch der von Piper[4] und der von Levy[5] beschriebene angeführt.

Es ist im obigen erwähnt worden, daß in bezug auf die Mischungsgleichungen sich zwischen Personen mit normalem Farbensinn, sowie auch zwischen Dichromaten des gleichen Typus gewisse individuelle Unterschiede bemerkbar machen. Diese Tatsache ist wohl zuerst von Maxwell[6] bemerkt worden, der auch die Vermutung aussprach, daß diese in physikalischen Verhältnissen, namentlich der (individuell verschieden starken) Gelbfärbung der Stelle des deutlichsten Sehens ihren Grund haben möchten. Auch in bezug auf diese Verhältnisse liegt zur Zeit ein ziemlich ausgedehntes Beobachtungsmaterial vor, auf Grund dessen wir die Annahme Maxwells mit großer Wahrscheinlichkeit als wenigstens für einen Teil der hierher gehörigen Erscheinungen zutreffend ansehen dürfen.

Eine direkte physikalische Untersuchung des an der Stelle des deutlichsten Sehens vorhandenen Pigmentes wurde auf Veranlassung Herings von Sachs[7] vorgenommen (an herauspräparierten menschlichen Netzhäuten). Sachs fand hierbei, daß die langwelligen Lichter nicht merklich absorbiert werden. Die Absorption beginnt im gelblichen Grün und wird mit abnehmender Wellenlänge immer stärker. Was die individuellen Unterschiede der Mischungsgleichungen anlangt, so zeigten v. Frey und ich,[8] daß sie für uns mit Bezug auf eine größere Zahl und verschiedene Arten solcher Gleichungen von der Art waren und zueinander in solcher Beziehung standen, wie dies sich aus der Annahme einer Pigmentierung verständlich machen läßt.

Sehr viel einfacher sind die analogen Erscheinungen innerhalb der gleichen Klasse von Dichromaten. Bei zwei von mir systematisch untersuchten Protanopen traten solche Unterschiede in den vorher erwähnten Eichungen mit großer Deutlichkeit und Regelmäßigkeit zutage. Hier kann man die Stärke der Absorption (oder richtiger gesagt, das Verhältnis der bei dem einen und andern stattfindenden Absorption) für verschiedene Lichtarten ermitteln, indem

---

[1] Zeitschrift für Physiologie der Sinnesorgane. **41**, S. 74. 1906.
[2] Pflügers Archiv. **57**, S. 191. 1894.
[3] Ebenda. **57**, S. 308. 1894.
[4] Zeitschrift für Psychologie. **38**, S. 155. 1905.
[5] Archiv f. Ophth. **62**, 3. S. 464. 1906.
[6] Philos. Transactions 1860.
[7] Pflügers Archiv 50. S. 574. 1891.
[8] Archiv für (Anatomie und) Physiologie 1881. S. 336.

man die in dem gleich erscheinenden Rot-Blau-Gemisch enthaltenen Rotmengen vergleicht. Ich erhielt so die folgende Tabelle:

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Wellenlänge . . . . | 670,8 | 656 | 692 | 568 | 615 | 603 | 591 | 581 | 571 $\mu\mu$ | | |
| Berechnetes Verhältnis | 1,1 | 1,1 | 1,05 | 1,00 | 1,00 | 1,07 | 1,07 | 0,98 | 0,96 | | |
| Wellenlänge . . . . | 561 | 552 | 544 | 536 | 525 | 515 | 505 | 496 | 488 | 480 | 469 $\mu\mu$ |
| Berechnetes Verhältnis | 1,02 | 0,91 | 0,91 | 0,97 | 0,91 | 0,63 | 0,63 | 0,57 | 0,42 | 0,41 | 0,3 |

Man sieht, daß hier die Absorption (in guter Übereinstimmung mit den Befunden von Sachs) etwa bei 525 $\mu\mu$ anfängt deutlich zu werden.

Auf die Beeinflussung der optischen Gleichungen durch die Maculafärbung weisen ferner auch die Unterschiede hin, die in dieser Hinsicht bei derselben Person zwischen der Stelle des deutlichsten Sehens selbst und den ihr nahe benachbarten („parazentralen") Stellen zu beobachten sind. Die meisten Personen können leicht bemerken, daß, wenn sie ein Gemisch aus Rot und komplementärem Blaugrün auf Farblosigkeit einstellen wollen, sie das Mengenverhältnis erheblich anders machen müssen, je nachdem jenes Resultat für die direkte Fixation oder für parazentrale Betrachtung erreicht werden soll. Ist das Gemisch für den ersteren Fall richtig eingestellt, so erscheint es bei leichter Abwendung des Blickes deutlich grün. Die Unterschiede der zentral und parazentral gültigen optischen Gleichungen sind von Breuer[1] genauer verfolgt und mit der Annahme eines absorbierenden Pigmentes gleichfalls in guter Übereinstimmung gefunden worden.

Eine genauer messende Ermittelung der Absorptionen stößt auf Schwierigkeiten, da die Pigmentierung wenigstens vielfach eine ziemlich ausgedehnte ist, daher eine Herstellung von optischen Gleichungen für Stellen, die sicher außerhalb der Macula liegen, nicht mehr mit genügender Genauigkeit möglich ist. Der Betrag der individuellen Unterschiede läßt sich auf Grund von Beobachtungen an zahlreichen Personen einigermaßen schätzen. Danach dürfte sich die Stärke der zu den Sehsubstanzen gelangenden (durch die Absorption im Pigment geschwächten) blauen Lichter bei Personen schwächster und stärkster Makulatingierung etwa wie 1 : 0,3 verhalten.

In ähnlicher Weise wie der Farbstoff des gelben Fleckes kann auch eine allgemeine Färbung der Augenmedien, insbesondere wohl des Glaskörpers und der Linse in Betracht gezogen werden. Daß die Linsen älterer Personen eine leichte Gelbfärbung zeigen, ist bekannt. Von der Bedeutung und dem Erfolge dieser Färbungen kann man versuchen, sich ein Bild zu verschaffen, indem man für verschiedene Personen das Verhältnis der Dämmerungswerte gelber und blauer Lichter prüft, wobei die Stelle des deutlichsten Sehens außer Funktion ist. Daß sich dabei gelegentlich wenn auch nur kleine, doch die Fehlergrenzen sicher überschreitende Unterschiede finden, ist bereits von Nagel und Stark[2] gefunden worden. Die Deutung dieser Unterschiede als Absorptionen im Linsen- oder Glaskörperpigment ist jedoch durch den Umstand erschwert, daß das Makulapigment sich über den des Dämmerungssehens ermangelnden Bezirk ziemlich weit hinaus erstreckt. Auch sind die Dämmerungsgleichungen ohnehin (wie oben erwähnt) nicht ganz konstant, sondern vom Adaptationsgrade, wenn auch nicht sehr erheblich, abhängig.

[1] Zeitschrift für Psychologie usw. **13**, S. 464.

[2] Stark, Beitrag zur Lehre von der Farbenblindheit. Diss. Freiburg 1897.

Neuerdings hat Hess[1] von einer größeren Zahl von Personen Dämmerungsgleichungen zwischen gelben und blauen (physikalisch nicht definierten) Lichtern einstellen lassen und dabei nicht selten beträchtliche Unterschiede gefunden, die er auf Glaskörper- und Linsentingierungen bezieht.

Die im obigen festgehaltene, bislang wohl fast allgemein angenommene Anschauung über das Makulapigment und seine Bedeutung ist (wie schon oben S. 256 erwähnt) neuerdings von Gullstrand[2] in Zweifel gezogen worden. Ich habe mich bis jetzt nicht davon überzeugen können, daß seine Einwände gegen die bisherige Auffassung entscheidend wären und diese durch die von ihm befürwortete ersetzt werden müßte.[3]

Eine andere Frage ist es, ob etwa neben den hier berührten physikalischen Verhältnissen noch andere individuelle Unterschiede bestehen. Solche anzunehmen ist Frl. v. Maltzew[4] geneigt. Da es sich jedoch dabei um Beobachtungsweisen handelt, auf die wir erst an späterer Stelle zu sprechen kommen, so empfiehlt es sich auch, auf die Frage solcher individuellen Unterschiede erst dort einzugehen.

Eine umfangreiche und wichtige Erweiterung gegenüber der in der ersten Auflage dieses Werkes niedergelegten haben unsere Kenntnisse durch die genauere Erforschung derjenigen Formen des Farbensinnes erfahren, die König als anomale trichromatische Systeme bezeichnet hat. Den Ausgangspunkt dieser Untersuchungen bildete eine von Rayleigh[5] entdeckte Tatsache. Wenn man eine große Anzahl von Personen Mischungen aus homogenem Rot und Gelbgrün (671 und 536 $\mu\mu$, der Lithium- und Thalliumlinie entsprechend) so herstellen läßt, daß das Gemisch einem homogenen Gelb (589 $\mu\mu$; Natriumgelb) gleich erscheint, so findet man, daß nicht immer das gleiche Mengenverhältnis des roten und grünen Lichtes eingestellt wird. Für die große Mehrzahl zwar ergeben sich nur relativ geringe Differenzen. Auch schließen sich die Einstellungen dieser Personen stetig aneinander, so daß sie sich naturgemäß in eine Gruppe zwar nicht genau, aber annähernd untereinander übereinstimmender Individuen zusammenordnen. Es sind dies, wie wir vorgreifend sogleich anführen wollen, die Personen, deren Farbensinn wir als einen ganz normalen betrachten dürfen. Auf die auch innerhalb dieser Klasse vorkommenden Unterschiede der Rayleigh-Gleichung werden wir später zurückzukommen haben. Daneben findet sich eine kleinere Zahl von Personen, deren Einstellungen von jenen sehr erheblich abweichen. Und zwar findet man sowohl solche, die in der Mischung weit mehr Grün, als auch solche, die weit mehr Rot nehmen als die Mehrzahl. Rot-Grün-Gemische also, die für diese Personen dem Natriumgelb gleich erscheinen, sind für die Mehrzahl in dem einen Falle ausgesprochen grün, im anderen ausgesprochen rot. Da, wie gesagt, wir Anlaß haben, die bei der Mehrzahl der Sehorgane zu konstatierende Verhaltungsweise als eine bessere und vollkommenere, die Abweichungen als Anomalien zu bezeichnen, so erscheint es zutreffend, hier von anomalen trichromatischen Systemen zu reden. Auch sei sogleich erwähnt, daß die eben besprochene Prüfung sich zwar nicht als das einzige, aber doch als das beste und zuverlässigste Mittel zu ihrer Erkennung herausgestellt und dadurch eine besondere Wichtigkeit gewonnen hat. Man hat aus diesem Grunde für jene Gleichungen (zwischen

[1] Archiv f. Augenheilkunde **63**, S. 164. 1909.
[2] Arch. f. Ophth. **62**, S. 1. 1905.
[3] Ich hoffe auf den Gegenstand in kurzem an anderer Stelle zurück zu kommen.
[4] Ztschr. für Physiologie der Sinnesorgane **43**, S. 76. 1909.
[5] Nature **25**, S. 64. 1881.

Natriumgelb und Lithium-Thallium-Gemischen) einen kurzen Namen eingeführt und bezeichnet sie als Rayleigh-Gleichung.

Man nennt ferner nach dem Vorschlage Nagels, aus Gründen, die sich aus den sogleich zu besprechenden Tatsachen ergeben, die eine Klasse dieser Personen, nämlich diejenigen, die in der Rayleigh-Gleichung das Gemisch zu rot (im Vergleich zum normalen) einstellen, Protanomale; die anderen, die es zu grün einstellen, Deuteranomale.

Eine genauere Prüfung der anomalen Trichromaten läßt zunächst erkennen, daß ihre Abweichung von der Norm nicht auf der Absorption des Lichts in einem Farbstoff (sei es der Augenmedien, sei es der Netzhaut) beruhen kann. Wäre nämlich dies der Fall und würde z. B. in den Augen eines Normalen und eines Anomalen das grüne Licht derart ungleich geschwächt, daß die zu den Sehsubstanzen gelangenden Mengen sich etwa $1 : \alpha$ verhielten, so müßte der Anomale (sonst gleiche Beschaffenheit des Sehorgans vorausgesetzt), um ein Rot-Grün-Gemisch irgend einem homogenen Lichte gleich zu machen, stets im Verhältnis von $1 : \alpha$ mehr Grün nehmen, als der Normale. Dies ist aber keineswegs der Fall. Vielmehr zeigt sich, daß die beiden Rot-Grün-Verhältnisse (das des normalen und das des anomalen) sich, je nach der Art des homogenen Lichtes, mit dem die Gleichung eingestellt wird, in sehr verschiedenem Maße unterscheiden, und daß der Quotient der beiden Verhältnisse sich in regelmäßiger Weise mit der Wellenlänge jenes homogenen Lichtes ändert. Als Beispiel führe ich die nachstehenden Tabellen an[1]:

| Homogenes Licht | Quotient der für den einen und den andern Beobachter erforderlichen Verhältnisse roten und grünen Lichtes |
|---|---|
| 628 $\mu$ | 4,51 |
| 615 „ | 3,74 |
| 603 „ | 3,15 |
| 591 „ | 3,14 |
| 581 „ | 2,68 |
| 571 „ | 2,48 |
| 561 „ | 2,15 |
| 552 „ | 2,12 |

| Homogenes Licht | Quotient der für den einen und den andern Beobachter erforderlichen Verhältnisse roten und grünen Lichtes |
|---|---|
| 625 $\mu$ | 0,019 |
| 313 „ | 0,123 |
| 601 „ | 0,230 |
| 589 „ | 0,278 |
| 579 „ | 0,262 |
| 569 „ | 0,249 |
| 559 „ | 0,176 |
| 550 „ | 0,080 |

Man kann aus dieser Tatsache, wie gesagt, den Schluß ziehen, daß die hier vorliegenden Abweichungen nicht physikalischer Natur sind. Es muß sich vielmehr um irgendwelche Modifikationen in den vom Licht affizierbaren Teilen

[1] S. v. Kries Zeitschrift für Psychologie usw. **19**, S. 65.

des Sehorgans handeln. Man hat, um dies zum Ausdruck zu bringen und insbesondere auch den theoretisch wichtigen Gegensatz anzudeuten, in dem sie zu den Reduktionssystemen stehen, diese Formen des Farbensinns als Alterationssysteme[1] bezeichnet. Während für das Reduktionssystem alle optischen Gleichungen des normalen zutreffen, ist es für das Alterationssystem charakteristisch, daß dies nicht der Fall ist, daß es, wie bei der Rayleigh-Gleichung besonders frappant zu sehen ist, die dem normalen Sehorgan gleich erscheinenden Lichter stark verschieden sieht und die Einstellungen beträchtlich ändern muß, um Gleichheit zu erzielen.

Eine vollständige Eichung eines Spektrums ist von anomalen Trichromaten bis jetzt ebensowenig wie von normalen ausgeführt worden. Ähnlich wie für diese liegen solche Eichungen nur für den weniger brechbaren Teil des Spektrums vor. Für diesen sind sie von einem der ersten und einem der zweiten Form zugehörigen Beobachter durchgeführt worden.

Unterwirft man die Ergebnisse dieser Eichungen einer ähnlichen Berechnung wie sie oben für die des normalen Sehorgans erwähnt wurde, so zeigt sich, daß die Gleichungen der einen Form für den Deuteranopen, die der anderen für den Protanopen mit großer Annäherung zutreffen. Im Sinne der Helmholtzschen Theorie wird hierdurch wahrscheinlich, daß von den angenommenen drei Bestandteilen des Sehorgans jedesmal nur der eine eine Modifikation gegenüber der Norm aufweist. Werden z. B. die Gleichungen eines Anomalen vom Deuteranopen anerkannt, so werden wir schließen dürfen, daß er bezüglich des Rotbestandteiles mit diesem (somit auch mit dem normalen) übereinstimmt. Betrifft seine Anomalie den Grünbestandteil, so werden seine Gleichungen zwar für den Normalen unrichtig sein, von dem jenes Bestandteils ganz ermangelnden Deuteranopen dagegen anerkannt werden. Dies scheint nun, wie gesagt, in der Tat der Fall zu sein. Man kann demgemäß annehmen, daß bei den Protanomalen eine Alteration der Rotkomponente, bei den Deuteranomalen eine solche der Grünkomponente vorliegt.

Die theoretische Klärung der hier vorliegenden Anomalien wird einigermaßen dadurch erschwert, daß weder die Rot- noch die Grünanomalen einen einheitlichen Typus darstellen, beide Formen vielmehr Personen umfassen, die untereinander noch verschieden sind, wenn auch vielleicht die zwischen ihnen bestehenden Differenzen als Gradunterschiede einer und derselben Abweichung von der Norm betrachtet werden können. Diese Unterschiede kommen in der Rayleigh-Gleichung nicht so deutlich zum Ausdruck, wie man erwarten könnte, was wohl darin seinen Grund hat, daß ja auch bei normalen Personen aus physikalischen Gründen die Rayleigh-Gleichung nicht ganz unerheblich schwankt. Sehr greifbar dagegen machen sich diese Gradunterschiede der Anomalie in bezug auf eine Reihe weiterer Erscheinungen bemerklich.

Abgesehen von den Abweichungen der optischen Gleichungen bzw. der Eichungen sind nämlich bei den Personen mit anomalen Farbensystemen eine Reihe wichtiger Eigentümlichkeiten zu bemerken, deren genauere Kenntnis wir

[1] Die Unterscheidung von Reduktions- und Alterationssystemen deckt sich sachlich mit der von Hering gemachten (Pflügers Archiv. **57**, S. 308), dessen Bezeichnungsweise (qualitative und quantitative Modifikationen des Farbensinnes) jedoch nicht sehr glücklich ist und leicht zu Mißverständnissen Anlaß geben kann. Vgl. darüber die Auseinandersetzung in meinem Aufsatz Über Farbensysteme Zeitschr. für Psychologie und Physiol. der Sinnesorgane **13**, S. 246 f.

namentlich den Untersuchungen von Nagel[1] verdanken. Schon Donders hatte die Ansicht ausgesprochen, daß diese Personen einen „schwachen Farbensinn" besäßen. Dies hat sich nun in der Tat durchaus bestätigt, so zwar, daß die Anomalie des Farbensystems in dem hier festgelegten Sinne (abweichende Einstellung der Rayleigh-Gleichung) als ein wichtiges und sicheres Kriterium der „Farbenschwäche" in Anspruch genommen werden darf.

Es handelt sich dabei z. T. wohl um Herabsetzungen der Unterschiedsempfindlichkeit, ganz vorzugsweise aber um Beeinträchtigungen des absoluten Erkennungsvermögens für Farben.

Was den ersteren Punkt anlangt, so stellen die meisten Anomalen die Rayleigh-Gleichungen, viele auch die Gleichungen zwischen beliebigen anderen homogenen Lichtern und Rot-Grün-Gemischen mit einer Genauigkeit ein, die hinter der des normalen nur wenig zurückbleibt.

Auch in diesen Fällen scheint jedoch die Unterschiedsempfindlichkeit gegen Änderungen der Wellenlänge eine herabgesetzte zu sein. So fand z. B. Guttmann bei 589 $\mu\mu$ für sich mittlere Fehler von 12—13 $\mu\mu$, während sie sich für die unter gleichen Bedingungen arbeitenden Normalen nur auf 1—2 $\mu\mu$ beliefen.

Daneben aber findet man andere, deren Verhalten komplizierter ist. Sie müssen z. B., um eine Gleichung mit Natriumlicht oder einem von noch größerer Wellenlänge zu erhalten, im Gemisch ein annähernd bestimmtes Verhältnis zwischen Rot und Grün herstellen. Macht man dagegen den Versuch mit einem homogenen Lichte, dessen Wellenlänge beträchtlich kleiner als 589 $\mu\mu$ ist, so werden die Einstellungen völlig unsicher und schwankend. Mäßige Mengen von Rot stören die Gleichungen nicht; aber das Rot kann auch auf Null reduziert, d. h. also homogenes Licht 536 $\mu\mu$ neben dem Gelb dargeboten werden, ohne daß die Felder aufhörten, wenigstens annähernd gleich zu erscheinen. Hier ist also offenbar die Unterschiedsempfindlichkeit für die Änderungen der Wellenlänge in der Gegend von 570—535 $\mu\mu$ überaus stark herabgesetzt. Es sind dies extreme Fälle von Deuteranomalie. Ebenso kommen auch extreme Fälle von Protanomalie vor, in denen homogenes Gelb und namentlich Lichter von etwas größerer Wellenlänge dem spektralen Rot fast gleich erscheinen. Auch hier kann dann die Einstellung der optischen Gleichungen zwischen Rot-Grün-Gemischen und gewissen homogenen Lichtern ganz versagen.

Einen noch einfacheren Ausdruck findet die Schwäche des Farbensinnes darin, daß die absolute Erkennung von Farben mehr oder weniger herabgesetzt ist. So ist für die Anomalen namentlich eine weit größere Ausdehnung des farbigen Objekts als in der Norm erforderlich. Die Verkleinerung des Gesichtswinkels, unter dem ein solches Objekt erscheint, genügt, um die Farbe unerkennbar zu machen, und zwar tritt dies ein bei Ausdehnungen, die dem Normalen eine Erkennung noch mit Leichtigkeit gestatten.

Regelmäßig ist ferner die Erkennung der Farben auch insofern beeinträchtigt, als die Anomalen dazu eine längere Zeit nötig haben. Macht man die farbigen Objekte für sehr kurze und meßbare Zeiten sichtbar, so hört die Möglichkeit der Erkennung für die Anomalen bei sehr viel längeren Expositionszeiten auf, als für den Normalen.

Mit der großen Unsicherheit des absoluten Erkennens mag wohl auch eine andere Eigentümlichkeit zusammenhängen, die Nagel bei allen Anomalen be-

[1] Klinische Monatsblätter f. Augenheilk. **42**, S. 356. 1904. — Zeitschr. für Psychologie usw. **41**, S. 239, 319, 455. 1906. — Ferner Guttmann ebenda, **42**, S. 24 u. 250. 1907.

sonders auffällig fand, nämlich eine (mindestens scheinbare) Steigerung gewisser Kontrasterscheinungen. So wird z. B. ein gelbes Feld, für sich allein betrachtet, richtig als gelb bezeichnet. Wird es dagegen in Benachbarung mit einem roten dargeboten, so wird es grün genannt. Hierauf beruht die in praktischer Hinsicht sehr wichtige Tatsache, daß bei der Betrachtung zweier benachbarter ungleichfarbiger Objekte die Anomalen großen, für den Normalen ganz ausgeschlossenen Irrtümern ausgesetzt sind, z. B. eine Gas- oder elektrische Lampe von der gewöhnlichen schwach gelben Färbung neben einer roten für grün halten.

## 2. Die Erscheinungen des Tagessehens unter besonderen, die Erkennung der Farben erschwerenden oder ausschließenden Bedingungen.

Wir haben uns bei der obigen Darstellung der Sehweise normaler und nicht normaler Personen in der Hauptsache auf ganz bestimmte Bedingungen beschränkt, und zwar diejenigen, die für die Unterscheidung und Erkennung von Farben möglichst günstig sind. Auch für das normale Sehorgan kennen wir Bedingungen, unter denen die Empfindungen hinsichtlich ihrer farbigen Bestimmungen modifiziert sind, oder diese ganz fehlen. Dahin gehört vor allem der Fall, daß die betreffenden Lichter nicht die Stelle des deutlichsten Sehens, sondern mehr oder weniger exzentrische Netzhautstellen treffen, ferner die Verminderung der zeitlichen Dauer oder der räumlichen Ausdehnung der Objekte.

Was den ersteren Punkt anlangt, so sind die hierhergehörigen Tatsachen z. T. bereits im Text behandelt (S. 128). Wie dort schon angegeben, hängt der farbige Charakter der durch ein bestimmtes Licht ausgelösten Empfindung für die exzentrischen Netzhautteile in sehr hohem Grade von der absoluten Lichtstärke und von der räumlichen Ausdehnung ab. Hieraus, z. T. auch aus der Anwendung nicht genau definierter Pigmentfarben, erklären sich die zahlreichen Widersprüche in den Angaben der älteren Untersuchungen. In vielen Punkten sind die Verhältnisse durch die Untersuchungen von Hess[1] geklärt worden. Ihm zufolge findet man, daß bei der Überführung auf mehr und mehr exzentrische Netzhautteile die Mehrzahl der Farben ihr Aussehen ändert. Nur vier ganz bestimmte Farbentöne nähern sich ohne qualitative Änderung der Farblosigkeit. Diese „invariabeln" Farben sind ein Grün von 495 $\mu\mu$ und ein (ihm annähernd komplementäres) Rot (spektrales Rot mit einem kleinen Zusatz von Blau), ferner ein Gelb (574,5 $\mu\mu$) und ein Blau (471 $\mu\mu$). Von diesen büßen die beiden erstgenannten ihre Farbe in relativ kleinem, die letzteren erst in sehr viel größerem Abstande vom Zentrum ein. Gibt man dem grünen und roten Objekt gleiche Größe, gleiche Sättigung (d. h. solche, daß z. B. auf dem Farbenkreisel gleich große Sektoren erforderlich sind, um eine farblose Mischung zu erhalten) und überdies auch gleiche Helligkeit,[2] so erhält man für Rot und Grün die gleichen

[1] Archiv f. Ophth. 35, (4) S. 1.

[2] Die Hesssche Untersuchung ist in diesem Punkte mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Er gibt als Bedingung an, daß die beiden Farben gleiche „Weißvalenz" besitzen müssen. Die Weißvalenzen sind dabei in doppelter Weise definiert, und zwar einerseits so, daß sie das bedeuten, was wir jetzt Dämmerungswerte, zugleich aber so, daß sie das bedeuten, was wir jetzt Peripheriewerte nennen (s. u. S. 348). Es war damals noch nicht bekannt, daß diese Dinge durchaus verschieden sind. Vermutlich wird die hier in Frage kommende Bedingung wohl (sofern mit helladaptiertem Auge geprüft wird) dahin zu bestimmen sein, daß die Peripheriewerte der betreffenden Farben gleich sein müssen.

Grenzen. Dasselbe gilt für Gelb und Blau. Da, wie erwähnt, die Grenzen für Gelb und Blau weiter sind als für Rot und Grün, so kann man für Objekte von bestimmter Größe, Lichtstärke und Sättigung von einer dichromatischen Zone sprechen. In dieser erscheinen das invariable Rot und Grün farblos, das invariable Gelb und Blau in ihrer gewöhnlichen Farbe. Für die qualitativen Änderungen aller Farben, die zwischen jenen invariablen liegen, ergibt sich die einfache Regel, daß in der Empfindung das Rot (bzw. Grün) schneller schwindet als das Blau (bzw. Gelb), sie sich also diesem letzteren annähern. Violett und Blaugrün gehen also in Blau, Orange und Grüngelb in Gelb über.

Die Sehweise der dichromatischen Zone ist jedenfalls von der des protanopischen Sehorgans verschieden. Mit der des deuteranopischen dürfte sie annähernd übereinstimmen; ob diese Übereinstimmung eine ganz genaue ist, steht nicht fest; wir kommen auf diese Frage später zurück.

Eine äußerste Zone der Netzhaut, in der noch gelbe und blaue Gegenstände farblos gesehen werden, kann man als total farbenblind (monochromatisch) bezeichnen, wobei wieder zu beachten ist, daß die Ausdehnung dieser Zone sehr von der Lichtstärke und der Größe der Objekte abhängt. Am besten ist das Farbloswerden am nasalen Gesichtsfeldrande zu beobachten. Papierschnitzel beliebiger Farbe auf grauem Grunde werden, wenn man sie von dieser Seite vorsichtig ins Gesichtsfeld hereinbringt, stets zuerst entweder als hellerer oder als dunklerer Fleck (ohne Farbe) gesehen. Unter diesen Bedingungen bedarf es für ganz beliebige Lichterpaare nur einer passenden Bestimmung ihrer Stärkeverhältnisse, um sie genau gleich erscheinen zu lassen, und die Sehweise kann daher ganz ebenso wie für ein total farbenblindes Sehorgan in der Weise festgelegt werden, daß man die für die verschiedenen Teile des Spektrums hierzu erforderlichen Intensitäten oder die Verteilung der hier in Betracht kommenden Reizwerte im Spektrum ermittelt. Ich habe diese Reizwerte als Peripheriewerte bezeichnet und ihre Verteilung im Dispersionsspektrum des Gaslichts bestimmt. Um die theoretisch wichtige Tatsache sogleich hervortreten zu lassen, daß die Peripheriewerte in ganz anderer Weise als die Dämmerungswerte von der Lichtart abhängen, gebe ich in der nachstehenden Tabelle sowohl die Peripherie- wie die Dämmerungswerte als Funktion der Wellenlänge nach meinen Bestimmungen (die betreffenden Werte für das Natriumlicht sind = 100 gesetzt).

| Wellenlänge . . | 680 | 651 | 629 | 608 | 589 | 673 | 558 | 530 | 513 $\mu\mu$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Peripheriewert . | 9,6 | 37,5 | 77,5 | 101 | 100 | 79,1 | 52,2 | 28,5 | 14,6 |
| Dämmerungswert | ? | 3,4 | 14,0 | 35,5 | 100 | 256 | 351 | 321 | 198 |

Die Figur 78 veranschaulicht diese Verhältnisse in der üblichen Weise.

Wie oben erwähnt, kann man die Empfindung ihres farbigen Charakters auch dadurch berauben, daß man die zeitliche Dauer oder die räumliche Ausdehnung des einwirkenden Lichtes herabsetzt. Die ersteren Verhältnisse sind bis jetzt des genaueren nicht geprüft worden. Eine systematische Untersuchung der letzteren ist dagegen von Siebeck[1] ausgeführt worden. Nach seinen Beobachtungen gelingt es (für spektrale Lichter und mittlere Helligkeiten) an der Stelle des deutlichsten Sehens nicht, die Farben durch Verkleinerung des Feldes ganz zum Verschwinden zu bringen, wohl dagegen in sehr geringen Abständen vom Zentrum (1,5°). Hier läßt sich also ermitteln, in welcher Hellig-

[1] Zeitschrift für Physiologie der Sinnesorgane **41**, S. 71.

keit die verschiedenen Lichter unter diesen Umständen gesehen werden, eine Untersuchung, die der soeben besprochenen, bei der die Farben durch stark exzentrische Beobachtung beseitigt werden, ganz analog ist. Man kann die hier zu ermittelnden Reizwerte als Minimalfeldhelligkeiten bezeichnen. Die von Siebeck erhaltenen Resultate enthält die folgende Tabelle, die erkennen läßt, daß die Minimalfeldhelligkeiten gleichfalls von den Dämmerungswerten völlig verschieden sind, mit den Peripheriewerten annähernd übereinstimmen (Maximum bei 601,3 $\mu\mu$).

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Wellenlänge . . . | 658,0 | 650,1 | 642,4 | 635,0 | 627,8 | 620,8 | 604,2 | 607,8 | 601,3 |
| Minimalfeldhelligkeit | 44,9 | 56,7 | 66,6 | 72,1 | 84,2 | 91,5 | 104,3 | 112,8 | 128 |

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Wellenlänge . . . | 595,2 | 598,3 | 584,2 | 579,1 | 574,1 | 569,3 | 564,8 | 560,1 | 556,4 | 551,4 | 547,2 | 542,9 |
| Minimalfeldhelligkeit | 110,9 | 100 | 90 | 81,6 | 79,5 | 72,9 | 68,6 | 62,6 | 58,5 | 52 | 47,3 | 42,8 |

Bei der Ermittelung der Minimalfeldhelligkeiten sowie der Peripheriewerte vergleicht man die Helligkeiten verschiedenfarbiger Lichter, was eben deswegen ausführbar ist, weil unter den gegebenen Bedingungen die Empfindungen Unterschiede der Farbe nicht darbieten. Da die Helligkeitsvergleichung verschieden farbiger Lichter von allgemeinem Interesse und vielfach angestrebt worden ist, so kann man bei diesen Beobachtungen von Methoden einer heterochromen Photometrie[1] reden.

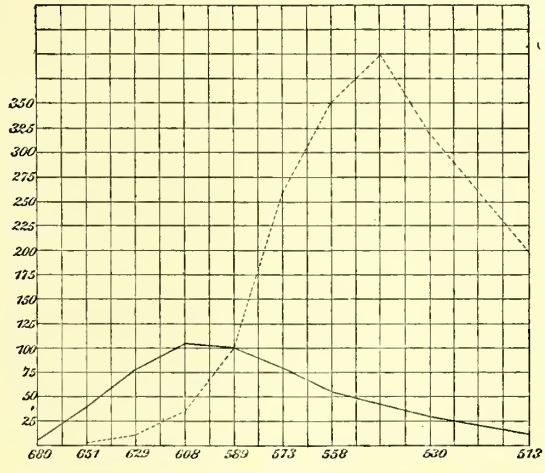



Fig. 78.

Verteilung der Peripheriewerte —— und der Dämmerungswerte ..... im prismatischen Spektrum des Gaslichts.

Ich will aus diesem Grunde hier eine Reihe weiterer Beobachtungen anschließen, die mit den eben besprochenen unter diesem Gesichtspunkt zusammengehören. Den Ausgangspunkt derselben bildet die folgende, zuerst von Rood gefundene Tatsache. Wenn man auf das Auge mittels einer rotierenden Scheibe in periodischem Wechsel ein farbiges und ein farbloses Licht einwirken läßt und die Stärke des letzteren systematisch verändert, so findet man eine bestimmte Stärke desselben, bei der eine geringste Frequenz des Lichtwechsels genügt, um die Empfindung gleichmäßig zu machen, das Flimmern zum Verschwinden zu bringen. Hat man also diese Stärke des farblosen Lichtes eingestellt und der rotierenden Scheibe eine Umlaufsgeschwindigkeit gegeben, bei der das Flimmern gerade aufhört, so wird es wieder deutlich, sobald man das

[1] Allerdings ist eine gewisse Aufmerksamkeit erforderlich, um sich durch diese Benennung nicht zu irrigen oder mindestens sehr fraglichen Annahmen verleiten zu lassen. So versteht es sich keineswegs von selbst, daß die Helligkeitsverhältnisse verschiedener Lichter notwendig die nämlichen sein müssen, wenn wir das Verschwinden der Farben auf verschiedene Weise erzielen, und ebensowenig, daß die gleiche Helligkeit zweier Empfindungen von verschiedener Farbe ein genau bestimmtes Verhältnis ist. Vergl. hierüber meine Ausführungen in Nagels Handbuch der Physiologie **3**, S. 28 u. 259.

farblose Licht stärker oder schwächer macht. Um einer theoretischen Deutung nicht vorzugreifen, haben wir zwei Lichter, deren Intensitäten auf das Minimum der Verschmelzungsfrequenz eingestellt sind, als flimmeräquivalent, diejenige Stärke farblosen Lichtes, mit dem ein bestimmtes farbiges flimmeräquivalent ist, als seinen Flimmerwert bezeichnet. Eine Bestimmung der Flimmerwerte für das prismatische Spektrum des Gaslichts ist von Polimanti[1] ausgeführt worden. Die von ihm gefundenen Werte enthält die folgende Tabelle:

| Wellenlänge | 687 | 664 | 642 | 624 | 606 | 588 | 565 | 543 | 526 | 500 $\mu\mu$. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Flimmerwerte | 28,3 | 31,2 | 56,6 | 75,2 | 87,9 | 100 | 83,1 | 48,1 | 25,0 | 21,9. |

Die Verteilung der Flimmerwerte stimmt, wie man sieht, mit der der Peripheriewerte und der Minimalfeldhelligkeiten wenigstens annähernd überein, während sie von der der Dämmerungswerte durchaus verschieden ist.

Außer den eben besprochenen sind noch eine erhebliche Anzahl anderer Verfahrungsweisen benutzt (z. T. auch nur vorgeschlagen) worden, um zu einer Helligkeitsvergleichung verschiedenfarbiger Lichter zu gelangen.

Vierordt[2] betrachtete als gleich hell diejenigen Stärken farbiger Lichter, denen hinzugefügt ein bestimmtes weißes Licht sich gerade an der Grenze der Merklichkeit befindet. Nach einem (mit den vorhin erwähnten Roodschen nicht zu verwechselnden) gleichfalls auf die Flimmererscheinungen basierten Prinzip kann man diejenigen ungleichfarbigen Lichter als gleich hell betrachten, die bei unterbrochener Einwirkung die gleiche Frequenz des Lichtwechsels erfordern, um eine stetige (nicht flimmernde) Empfindung zu erzeugen (Haycraft[3], Rivers[4]).

Von Brücke ist ferner eine Beobachtung mitgeteilt worden, die für die räumliche Unterscheidung das analoge Verhalten bedeutet, wie die oben erwähnte Roodsche für die zeitliche. Farbige Objekte auf farblosem Grunde werden am schlechtesten (erst bei dem größten Gesichtswinkel) erkannt, wenn der farblose Grund eine ganz bestimmte Helligkeit hat, der man dann die Helligkeit der farbigen Objekte gleichsetzen kann.

Eine von v. Brücke[5] benutzte Methode bestand darin, daß der zu prüfenden Farbe kleine Mengen von verschiedenem Grau beigemischt werden. Bringt man auf einer farbigen Scheibe ein Stückchen graues Papier so an, daß es bei der Rotation einen Ring von passender Breite erzeugt, so läßt sich relativ sicher beurteilen, ob der Ring heller oder dunkler ist als die Umgebung, also ob das Grau heller oder dunkler als das farbige Papier ist. Das Verfahren ist im Grunde auch eine direkte Helligkeitsvergleichung bei ungleichen (und zwar bez. der Sättigung verschiedenen) Farben. Man hat jedoch den Vorteil, zwei Farben des gleichen Tons und von wenig verschiedener Sättigung zu vergleichen.

Endlich ist der Versuch, die Helligkeit farbigen Lichts ganz direkt nach dem subjektiven Eindruck und bei Sichtbarkeit der Farben zu vergleichen (wie dies früher schon von Fraunhofer ausgeführt und im Text besprochen ist), später noch von König[6] in etwas größerem Umfange wieder aufgenommen

---

[1] Zeitschrift für Psychologie usw. **19**, S. 263.
[2] Poggendorffs Annalen **137**. Die Anwendung des Spektralapparates. Tübingen 1871
[3] *Journal of Physiology* **21**, S. 126.
[4] Ebenda **22**, S. 137.
[5] Pflügers Archiv **98**, S. 90.
[6] Helmholtz Festschrift. 1891. S. 350

worden. Seine Ergebnisse (an fünf normalen Beobachtern) enthält die folgende Zusammenstellung.

| Wellenlänge | Helligkeit für Beobachter | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| $\mu\mu$ | I | II | III | IV | V |
| 670 | 0,855 | 1,120 | — | — | — |
| 650 | 2,381 | 2,137 | 1,15 | — | 0,64 |
| 625 | 3,460 | 3,413 | 2,06 | 1,10 | 1,24 |
| 605 | 3,650 | 3,247 | 2,56 | 1,66 | 1,56 |
| 590 | 3,030 | 2,645 | 2,38 | 2,05 | 1,58 |
| 575 | 2,358 | 1,923 | 2,00 | 2,08 | 1,56 |
| 555 | 1,695 | 1,389 | 1,50 | 1,65 | 1,36 |
| 535 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 520 | 0,554 | 0,553 | — | — | — |
| 505 | 0,224 | 0,250 | — | — | — |
| 490 | 0,0994 | 0,092 | — | — | — |

Man sieht, daß in annähernder Übereinstimmung mit den Peripherie- und Flimmerwerten sowie den Minimalfeldhelligkeiten das Helligkeitsmaximum wenigstens durchschnittlich noch rotwärts von der Na-Linie liegt. Die Ergebnisse der verschiedenen Versuchspersonen differieren freilich recht beträchtlich, gerade auch in bezug auf die Lage dieses Maximums. Es hat sich übrigens bestätigt, daß diese Versuche recht unsicher sind, die Einstellung zweier ungleicher Farben auf gleiche Helligkeit sehr schwankend ist und oft auch als willkürlich empfunden wird. Und es ist daher wohl auch schwer zu beurteilen, ob jene individuellen Unterschiede das Maß solcher Unsicherheiten und Schwankungen überschreiten.

Ein Teil der oben besprochenen Untersuchungen ist auf eine größere Zahl von Personen mit teils normalem, teils anomalem Farbensinn erstreckt worden und es muß hier noch auf die dabei gefundenen Tatsachen, da sie von einem gewissen theoretischen Interesse sind, kurz eingegangen werden.

Es scheint zunächst, daß auch bei normalen Personen in bezug auf diese Verhältnisse nicht ganz unbeträchtliche Unterschiede bestehen. In gewisser Weise wird dies schon in den eben erwähnten Beobachtungen König s bemerkbar. Aber auch für die Verfahrungsweisen, bei denen die hier durch die Ungleichfarbigkeit bedingte Unsicherheit beseitigt ist, stellen sich Unterschiede heraus. So fand Polimanti bei sich die Verteilung der Peripheriewerte, wenn auch nicht stark, doch deutlich von derjenigen verschieden, die ich ermittelt hatte.

Die ausgedehnten Versuche von Frl. v. Maltzew[1] betrafen hauptsächlich die Flimmerwerte und ergaben, daß in bezug auf sie auch innerhalb der normalen Trichromaten sehr beträchtliche Verschiedenheiten bestehen. Dabei scheinen diese mit den oben schon erwähnten Unterschieden in der Einstellung der Rayleigh-Gleichung in regelmäßigem Zusammenhange zu stehen, so zwar, daß diejenigen, die im Gemisch relativ viel Grün erfordern, dem Grün auch eine hohe Intensität geben müssen, um es einem bestimmten Rot flimmergleich zu machen.

Was die Erscheinungen bei anomalen Farbensystemen angeht, so zeigt sich, wie zu erwarten, daß auch bei den Dichromaten die ihnen überhaupt zukommenden Farbenempfindungen an der Stelle des deutlichsten Sehens die günstigsten Bedingungen finden. Jenseit eines gewissen Abstandes vom Zentrum

[1] Zeitschrift für Physiologie der Sinnesorgane **43**, S. 76. 1909.

wird also (geeignete Bedingungen vorausgesetzt) eine der farbigen Bestimmungen ganz ermangelnde Sehweise gefunden. Auch für sie also lassen sich Peripheriewerte in gleicher Weise wie für den Normalen bestimmen. Es ergibt sich dabei, daß die Verteilung der Peripheriewerte für den Protanopen von den für den Farbentüchtigen geltenden völlig verschieden ist, wie dies die folgende Zusammenstellung zeigt[1]:

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Wellenlänge . . . . . | 680 | 651 | 629 | 608 | 587 | 573 | 558 | 530 | 513 |
| Peripheriewerte für den Protanopen . | 4,1? | 10,7 | 34,0 | | 100 | | 110 | | 36,4 |
| Peripheriewerte für den Normalen . . | 9,6 | 37,5 | 77,5 | 101 | 100 | 79,6 | 52,2 | 28,5 | 14,6 |

Ein ähnlicher Unterschied besteht auch mit Bezug auf die Flimmerwerte[2] und er besteht mit Bezug auf diese auch für das protanomale Sehorgan. Durchgängig sind also hier zur Erreichung des betr. Erfolges für das protanomale und das protanopische Sehorgan sehr viel größere Stärken des roten Lichtes erforderlich als für das normale.

Die Unterschiede, die hier zwischen dem normalen Farbensystem einerseits, dem protanopischen und protanomalen anderseits bestehen, sind übrigens so groß, daß sie auch bei der unsichersten Methode, der einfachen Vergleichung verschiedenfarbiger Lichter nach dem subjektiven Helligkeitseindruck, ganz unzweideutig zur Erscheinung kommen, wie dies von einer Anzahl von Beobachtern festgestellt ist.[3]

Was das deuteranopische Sehorgan anlangt, so hatte ich bei meinen ersten Beobachtungen einen sehr geringfügigen (die Fehlergrenze kaum überschreitenden) Unterschied zwischen den Peripheriewerten eines solchen und eines normalen gefunden. Im Gegensatz hierzu glaubte Angier[4] einen solchen Unterschied mit Sicherheit konstatieren zu können. Die Berechtigung dieses Schlusses ist jedoch durch die vorhin erwähnten Befunde von Frl. v. Maltzew über die individuellen Verschiedenheiten innerhalb der normalen trichromatischen Systeme zweifelhaft geworden. Sie fand hinsichtlich der Flimmerwerte, wie erwähnt, sehr große Verschiedenheiten innerhalb der normalen Trichromaten. Die von ihr untersuchten Deuteranopen und Deuteranomalen ordneten sich zwischen jene ein. Sofern (was mindestens denkbar ist), die Verhältnisse der Peripheriewerte auch nur annähernd ähnliche individuelle Unterschiede aufweisen wie die Flimmerwerte, so würde zu erwarten sein, daß auch in bezug auf sie zwischen Normalen und Deuteranopen oder Deuteranomalen jedenfalls keine so großen Unterschiede bestehen, daß sie nicht durch die individuellen Verschiedenheiten innerhalb desselben Typus verdeckt werden können.

Nimmt man an, daß Normale und Deuteranopen hinsichtlich der Peripheriewerte übereinstimmen und weiter, daß Lichter von gleichen Peripheriewerten, auch wenn sie zentral, also verschiedenfarbig gesehen werden, den gleichen Helligkeitseindruck machen, so folgt, daß grüne und bläulichrote Lichter, die dem Deuteranopen gleich erscheinen, für den Farbentüchtigen etwa gleich hell gesehen werden, was in der Tat der Fall ist (soweit eben die große Unsicherheit heterochromer Helligkeitsvergleichung das zu beurteilen gestattet). Damit hängen gewisse von Schenck besprochene Eigentüm-

[1] v. Kries, Zeitschrift für Psychologie **15**, S. 266. Ähnliche Befunde später bei v. d. Wijde, Onderzoekingen, Utrecht. **4**, III. 2.

[2] Polimanti a. a. O. S. 274. — Levy, Zeitschrift für Psychologie usw. **36**, S. 83. 1904.

[3] Levy a. a. O. Schenck. Pflügers Archiv **118**, S. 174. 1907.

[4] Angier, ebenda **37**, S. 401. 1905.

lichkeiten der Farbentafel zusammen. Schon im Text ist dargelegt, daß die den Dichromaten gleich erscheinenden Farben auf geraden Linien liegen und alle diese Geraden sich in einem Punkt schneiden müssen (sofern das dichromatische System eine Reduktionsform des normalen ist). Dieser, im allgemeinen außerhalb des reellen Teils der Farbentafel liegende Punkt stellt die Reize dar, die allein auf die den Dichromaten fehlende Komponente wirken.

Die Konstruktion der Farbentafel und damit auch die Lage dieser Punkte ist insofern willkürlich, als wir die Mengeneinheiten der drei Eichlichter beliebig wählen können. Wir können sie unter allen Umständen so wählen, daß einer jener Punkte in unendliche Entfernung fällt, also die Verwechselungslichter eines Dichromaten auf parallele Linien fallen. Unter den hier gemachten Voraussetzungen müssten wir, damit dies für den Deuteranopen der Fall ist, die Mengeneinheiten der drei Eichlichter so wählen, daß sie für den Farbentüchtigen etwa gleiche Helligkeit besitzen.

Wir haben uns hier darauf beschränken müssen, die Anomalien des Farbensinnes unter den physiologisch vorzugsweise interessierenden Gesichtspunkten genauer zu besprechen. Es ist bekannt, daß der Gegenstand nach verschiedenen anderen Richtungen von großem Interesse ist. In bezug auf die allgemeinen biologischen Verhältnisse (Vererbung), statistische Ermittelungen sowie die praktische Bedeutung sei in erster Linie auf Holmgrens[1] immer noch maßgebendes Werk verwiesen.

In praktischer Hinsicht ist vor allem von Bedeutung, daß, wie die neueren Untersuchungen von Nagel ergeben haben, nicht nur die Dichromaten, sondern auch die Anomalen in einer Reihe von Hinsichten unterwertig, namentlich für den Eisenbahn- und Marinedienst nicht brauchbar sind. Dies ist denn auch für die Ausbildung der Untersuchungsmethoden in gewisser Weise maßgebend gewesen: der Untersuchung solcher Personen wird mit Recht jetzt die Aufgabe gestellt, alle „farbenuntüchtigen" Personen zu entdecken und auszuscheiden.

Was die Methode der Untersuchung anlangt, so ist es, wie schon im Text ausgeführt, von sehr geringem Werte, zu prüfen, wie verschiedenfarbige Gegenstände benannt werden. Dies gilt meines Erachtens (trotz des besonderen Wertes, der von manchen Seiten hierauf gelegt wird) auch von den Ermittelungen über Kontrastfarben. Als wirklich brauchbar haben sich nur die Methoden erwiesen; die darauf ausgehen, zu ermitteln, welche Farben der zu untersuchenden Person gleich aussehen. Da sich aber fest bestimmte Farben, die z. B. sämtlichen Deuteranopen genau gleich erscheinen, teils wegen der individuellen Unterschiede, teils auch schon wegen der technischen Unsicherheit in der Erzeugung der Farben, Wechsel der Beleuchtung usw. nicht in bequemer Weise herstellen lassen, so empfiehlt es sich, das Verfahren so einzurichten, daß es darauf ankommt, ob gewisse Farben den Untersuchten sehr annähernd gleich erscheinen. Dies war schon das Prinzip der Holmgrenschen Methode, bei der aus einem großen Sortiment farbiger Wollen diejenigen herausgesucht werden, die mit gewissen Mustern im Farbenton übereinstimmen. Auf das gleiche Prinzip sind auch die Nagelschen Täfelchen basiert, die sich wohl in den letzten Jahren als das brauchbarste und zuverlässigste Verfahren herausgestellt haben, auch nach sehr ausgedehnten vergleichenden Prüfungen amtlich für die Reichs-Marine und für den preußischen Eisenbahndienst eingeführt sind. Kein Verfahren kann die spektroskopische Prüfung der Rayleigh-

[1] Die Farbenblindheit in ihren Beziehungen zum Eisenbahn- und Marinedienst. Deutsche Ausgabe. Leipzig 1878.

Gleichung ganz entbehrlich machen, auf die zuweilen doch zurückgegriffen werden muß. Um diese Prüfung mit technisch relativ einfachen und nicht zu kostspieligen Hilfsmitteln ausführen zu können, wird von Schmidt & Haensch nach den Angaben Nagels ein als „Anomaloskop" bezeichneter Apparat gebaut, der zur Prüfung der Rayleigh-Gleichung dient, in dem also ein mit homogenem Gelb erleuchtetes Feld mit einem Rot-Grün-Gemisch verglichen wird.[1]

## II. Die Theorien des Licht- und Farbensinnes.

### 1. Die Young-Helmholtzsche Theorie.

Die ganze Natur der Gesichtsempfindungen, insbesondere auch die Art, wie sie von den einwirkenden Reizen abhängen, hat Helmholtz durch die seinen Namen tragende, an einen Gedanken von Th. Young anknüpfende Theorie verständlich zu machen gesucht. Für eine Besprechung einerseits dieser und anderseits der zahlreichen später in gleicher Richtung ersonnenen Hypothesen ergibt sich aus dem besonderen Anlaß dieser Darstellung der leitende Gesichtspunkt, den ich sogleich im voraus bezeichnen möchte.

Da, wie ich dies kürzlich an anderer Stelle dargelegt habe[2], die Helmholtzsche Theorie in ihren Grundgedanken auch gegenwärtig als eine durchaus berechtigte, mit den Tatsachen in gutem Einklang stehende und zur Erklärung einer sehr großen Anzahl von Tatsachen geeignete Annahme bezeichnet werden muß, so wird es uns in erster Linie obliegen, einerseits auf eine Reihe neuerlich bekannt gewordener Tatsachen hinzuweisen, in denen sie eine Bestätigung und Stütze gefunden hat, anderseits diejenigen Einschränkungen, Modifikationen und Ergänzungen zu besprechen, die sie allerdings im Hinblick auf eine Anzahl anderer Feststellungen wohl erfahren muß. Es wird sich dabei zugleich die Gelegenheit bieten, einigen Mißverständnissen entgegenzutreten, denen sie vielfach begegnet ist.

Eine Besprechung der, wie gesagt, sehr zahlreichen anderen Theorien des Sehorgans wird an zweiter Stelle hier auch erforderlich sein; doch glaube ich mich dabei auf einen allgemeinen Überblick und eine kurze Charakterisierung der Grundgedanken beschränken, von einer detaillierten Kritik aber und eingehenden Prüfung aller Wahrscheinlichkeiten und aller Bedenken Abstand nehmen zu dürfen, da, wie ich dies auch schon an anderer Stelle ausgesprochen habe, die Ausbildung von Hypothesen, die Zergliederung und Abwägung von Möglichkeiten über das, was nach Maßgabe unserer positiven Kenntnisse ratsam erscheint, vielfach hinausgegangen ist.

Eine ganz allgemeine Erwägung wird nun hier an erster Stelle jedenfalls

[1] Vgl. über die verschiedenen Untersuchungsmethoden namentlich Nagel, Die Diagnose der praktisch wichtigen angeborenen Störungen des Farbensinnes, 1899, sowie eine große Anzahl weiterer Arbeiten desselben Verfassers, von denen als die wichtigsten hier folgende erwähnt seien: Die Diagnose der anomalen trichromatischen Systeme, Klin. Monatsblätter für Augenheilkunde **42**, S. 369, 1904. Zwei Apparate für die augenärztliche Funktionsprüfung (Adaptometer und Anomaloskop), Zeitschrift für Augenheilkunde **17**. Fortgesetzte Untersuchungen zur Symptomatologie und Diagnostik der angebornen Störungen des Farbensinnes, Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane, **41**, S. 237 und **319** 1906. Versuche mit Eisenbahn-Signallichtern an Personen mit normalem und abnormem Farbensinn, ebenda **41**, S. 455.

[2] Nagels Handbuch der Physiologie III, S. 266 f.

betonen müssen, daß die Helmholtzsche Theorie im Grunde der ganz unmittelbare Ausdruck einer durch die Beobachtung direkt gegebenen Tatsache war, der nämlich, daß die Gesamtheit in ihren Empfindungserfolgen verschiedener Lichtreize als Funktion dreier Veränderlichen erschöpfend darzustellen ist. Diese Tatsache wird man vergebens auf andere Weise verständlich zu machen suchen als durch die Annahme, daß auch die Reizerfolge als solche sich als Funktion von drei Veränderlichen erschöpfend darstellen lassen, womit der Grundgedanke der Helmholtzschen Theorie gegeben ist. Die Berechtigung dieses Grundgedankens hat sich ganz besonders deutlich in den großen Schwierigkeiten gezeigt, in die jede Theorie verwickelt wurde, die eine größere Zahl von unabhängigen Valenzen annahm.

Sodann ist hier zu erwähnen, daß in bezug auf die dichromatischen Farbensysteme und ihre Beziehung zum normalen die oben (S. 336) angeführten Untersuchungen durchaus das bestätigt haben, was Helmholtz seinerzeit vermutete: daß es sich um zwei untereinander typisch verschiedene Farbensysteme handelt, die beide Reduktionsformen des normalen sind. Die hier vorliegenden Verhältnisse lassen sich also in der Tat (ganz wie es Helmholtz damals auf Grund nur ungenauer Beobachtungen vermuten durfte) in der befriedigendsten Weise als Ausfallserscheinungen erklären, indem das Fehlen hier eines, dort eines anderen Bestandteils des normalen Sehorgans angenommen wird.

Die Beobachtungen haben auch gezeigt, daß gar nicht daran gedacht werden kann, den Unterschied der beiden Typen der Dichromaten in anderer Weise (namentlich als durch physikalische Verhältnisse der Augenmedien bedingt) zu deuten. Es ist also kein Zweifel, daß die Theorie sich durch die einfache Art, in der sie von diesen Tatsachen Rechenschaft gibt, in sehr entschiedener Weise bestätigt.

Nicht ganz so einfach liegen die Dinge für die anomalen trichromatischen Systeme.

Will man die in bezug auf sie oben zusammengestellten Tatsachen theoretisch deuten, so wird man zunächst im Auge behalten müssen, daß es sich, wie dort betont wurde, um Alterationen handelt, Änderungen, denen zufolge die optischen Gleichungen des normalen für den anomalen nicht zutreffen. Hierdurch wird sogleich der Gedanke ausgeschlossen, daß etwa eine der normalen Komponenten, ohne Änderung ihrer Beschaffenheit, statt wie beim Dichromaten ganz zu fehlen, auf einen sehr geringen Betrag reduziert wäre. Wir könnten uns hierdurch zwar das Unterscheidungsvermögen in gewissen Hinsichten mehr und mehr herabgesetzt denken; aber die Gleichungen des normalen müßten dann für den anomalen gültig bleiben. Wir werden vielmehr auf einen allerdings in anderem Zusammenhang zuerst von Fick[1] entwickelten Gedanken zurückgreifen müssen. Das Verschieden-Erscheinen der Farben hängt ja von der Ungleichheit ihrer Wirkung auf die verschiedenen Bestandteile des Sehorgans ab. Denken wir uns das Sehorgan derart modifiziert, daß zwei Bestandteile nicht wie in der Norm erheblich verschiedene, sondern annähernd übereinstimmende Valenzkurven besitzen, so werden sie auch stets in nur wenig verschiedene Tätigkeiten versetzt werden können. Gewissen Unterschieden der erregenden Lichtart werden also geringere Unterschiede der physiologischen Vorgänge entsprechen, und das Organ wird in bezug auf gewisse Unter-

[1] Verhandlungen der physik-mediz. Gesellschaft zu Würzburg. V, S. 129, 1873. Pflügers Archiv **47**, S. 274.

scheidungen nur mangelhaft funktionieren. Fallen die Valenzkurven zweier Bestandteile ganz zusammen, so würde sich ein typisch dichromatisches Sehorgan ergeben. Wir werden also annehmen müssen, daß in der einen Gruppe der Anomalen der Rot-, bei der anderen der Grün-Bestandteil eine derartige Änderung erfahren habe, daß die für ihn geltende Valenzkurve modifiziert ist und zwar sich von der für den anderen (normalen) Bestandteil geltenden weniger unterscheidet, als dies beim Farbentüchtigen der Fall ist. Wir können uns auf diese Weise recht wohl eine Reihe von Übergängen zu der typischen Dichromasie der einen und der anderen Form hergestellt denken.

Für eine Berechnung dieser abgeänderten Valenzkurven haben wir vorderhand noch keinen Anhalt. Wenn jedoch die extremen Deuteranomalen alle Lichter von 589—536 $\mu\mu$ fast genau übereinstimmend sehen, so lehrt dies, daß die Valenzkurven beider Komponenten in dieser Strecke sehr nahezu proportional verlaufen. Und ebenso scheint es sich in den höchstgradigen Fällen von Protanomalie in der langwelligen Strecke etwa bis zum Natrium-Gelb zu verhalten.

Mit Wahrscheinlichkeit wird sich hieraus nun aber auch für die dichromatischen Farbensysteme resp. ihre Beziehung zum normalen eine etwas veränderte Auffassung ergeben. Eine zusammenfassende Erwägung macht es nämlich sehr wahrscheinlich, daß die anomalen trichromatischen Farbensysteme Zwischenformen zwischen dem normalen trichromatischen und den typisch dichromatischen darstellen, so zwar, daß die protanomalen zwischen ihm und dem protanopischen, die deuteranomalen zwischen ihm und dem deuteranopischen einen, sei es stufenweisen, sei es stetigen Übergang bilden. In der Tat lehren schon die oben erwähnten Beobachtungen, daß die anomalen, sobald wir ihr Farbenerkennungsvermögen durch Verminderung der Objektgröße herabsetzen, sich annähernd wie Dichromaten verhalten. Ob diese Übereinstimmung eine ganz genaue ist, ist für die geringeren Grade der Anomalie bis jetzt nicht festgestellt. Wohl dagegen zeigt sich, daß z. B. hochgradig Protanomale zwischen Rot (671 $\mu\mu$) und Gelb (589) eine Gleichung einstellen, die mit der der Protanopie übereinstimmt, dabei aber erklären, die Felder sähen zwar äußerst annähernd aber doch nicht ganz gleich aus. Für Deuteranopen und Deuteranomalen ist die Beziehung noch schärfer festgestellt. Bei der Untersuchung mit den kleinen Feldern der Spektralapparate können Personen sich wie typische Deuteranopen verhalten, während sie, mit großen Objekten geprüft, die charakteristischen Verwechslungsgleichungen niemals als ganz zutreffend anerkennen und sich somit als Trichromaten, wenn auch hochgradig anomale herausstellen.[1] Zu betonen ist dabei noch, daß auch in bezug auf die Helligkeitsverhältnisse (Peripheriewerte, Flimmerwerte usw.) der Protanomale sich dem Protanopen gleich oder mindestens sehr ähnlich, also vom normalen sehr verschieden verhält, die Deuteranomalen aber (ganz wie die Deuteranopen) gegenüber der Norm keine über die individuellen Schwankungen hinausgehen den Unterschiede erkennen lassen.

Fassen wir hiernach das dichromatische System als Höchstmaß einer Modifikation auf, deren geringere Grade die sog. anomalen Systeme charakterisieren, so gelangen wir zu der Vorstellung, daß bei ihnen nicht einfach ein Bestandteil des Sehorgans fehlt, sondern z. B. beim Protanopen der erste hinsichtlich seiner Affizierbarkeit durch verschiedene Lichtarten nicht die normale, sondern die normalerweise dem zweiten Bestandteil zukommende Beschaffenheit besitzt.

[1] Nagel, Zeitschrift für Psychologie usw. **39**, S. 96, 1905.

Ebenso würden beim Deuteranopen die Valenzkurven dieser beiden Bestandteile übereinstimmend diejenigen sein, die normalerweise dem ersten (der Rotkomponente) zukommt. Daß Sehorgane dieser Beschaffenheit, da zwei ihrer Bestandteile immer nur im nämlichen Verhältnis in Tätigkeit gebracht werden können, sich als dichromatische verhalten müssen, ist ohne weiteres deutlich.

Richtig ist allerdings, daß Alterationen uns doch nicht so einfach verständlich sind wie reine Ausfallserscheinungen, und daß das gesamte Gebiet nicht mehr ganz die Durchsichtigkeit besitzt, die ihm zuzukommen schien, so lange es so aussah, als ob es nur eine vollkommen typisch festgelegte und nur durch Ausfälle modifizierbare Organisation gäbe. Allein über das Vorkommen solcher Alterationen kann (da eine physikalische Erklärung für die großen Unterschiede in gewissen optischen Gleichungen ausgeschlossen ist), gar kein Zweifel bestehen. Eine gewisse Variabilität der Sehorgane ist also eine direkt konstatierte Tatsache, mit der jede Theorie sich abfinden muß.

Auch bei dieser Auffassung würde die typische Dichromasie einen ausgezeichneten Fall darstellen, indem zwei Valenzkurven genau übereinstimmen. Und in einem etwas erweiterten Sinne könnte man auch hier wohl von einer Ausfallserscheinung reden. Denn wenn z. B. normalerweise ein Bestandteil $A$ mit einem lichtempfindlichen Stoff $a$, ebenso $B$ mit $b$ ausgerüstet ist, so würde, wenn statt dessen sowohl $A$ als $B$ den lichtempfindlichen Stoff $b$ führte, darin eine abnorme Beschaffenheit des der Substanz $A$ zukommenden Lichtempfängers, und wenn man will, doch auch ein Fehlen von $a$ zu erblicken sein. Die Bedeutung der Tatsache, daß die vollkommen dichromatischen Systeme Reduktionsformen des normalen sind, erscheint also nicht vermindert, auch wenn es sich bei ihnen nicht um Ausfallserscheinung im allereinfachsten Sinne handelt.

Übrigens erledigt sich bei dieser Auffassung auch die Frage, von welcher Art die Empfindungen der Dichromaten eigentlich sind, ob z. B. der Protanop gemischtes weißes Licht auch farblos oder etwa blaugrün sieht. Obwohl man ja über die Empfindungen anderer Personen keinen sicheren Aufschluß erhalten kann, schien doch diese letztere Annahme immer sehr unwahrscheinlich, schon im Hinblick auf die Verhältnisse des Dämmerungssehens, ebenso auch auf die Erscheinungen bei erworbener und einseitiger Farbenblindheit. Die hier gemachte Annahme von dem Grunde der Dichromasie macht verständlich, daß die Dichromaten farbloses Licht nicht anders sehen, als der normale, und läßt vermuten, daß sowohl Protanopen als Deuteranopen die langwelligen Lichter gelb, die kurzwelligen blau sehen.

Eine umfangreiche Gruppe von Tatsachen, die bei der Aufstellung der Helmholtzschen Farbentheorie noch nicht bekannt waren, ist sodann durch die hauptsächlich mit der Adaptation zusammenhängenden Erscheinungen gegeben, die der Duplizitätstheorie zugrunde liegen (Dämmerungssehen, totale Farbenblindheit, Purkinjesches Phänomen usw.). Wir werden zu sehen haben, wie sich die Theorie mit diesen Tatsachen resp. den für ihre Erklärung allein in Frage kommenden Annahmen der Duplizitätstheorie in Beziehung setzen läßt.

Auf den ersten Blick könnte es ja nun scheinen, daß die Duplizitätstheorie zu der Helmholtzschen Theorie der Gesichtsempfindungen sich in direkten Gegensatz stellte. Denn nach dieser letzteren sollte ja die Empfindung farbloser Helligkeit durch eine Kombination der für sich eine Rot-Grün- und Violett-Empfindung erzeugenden Vorgänge entstehen, woran bei der Tätigkeit des Dämmerungsapparates nicht zu denken sein wird. Diese Schwierigkeit löst sich jedoch, wenn wir die Helmholtzsche Theorie in einer auch aus anderen Gründen wohl notwendigen Weise einschränken (wobei es dahin gestellt bleiben

soll, ob wir von der Meinung ihres Urhebers abweichen oder nur in gewissen von ihm zunächst offen gelassenen Hinsichten bestimmte Annahmen einführen).

Es muß hier zunächst daran erinnert werden, daß Helmholtz, wenn er einen Aufbau des Sehorgans aus drei Bestandteilen annahm, damit nicht eine Zusammensetzung der Empfindung aus drei Elementen (ähnlich den drei Tönen in einem Dreiklang) behaupten wollte. Er war vielmehr der Meinung, daß trotz einer Zusammensetzung des physiologischen Prozesses aus drei unabhängigen Bestandteilen die Empfindung sehr wohl etwas vollkommen einheitliches sein könne, was irgend eine Zerlegung in psychologische Elemente nicht gestatte. Die ausgezeichnete Stellung gewisser Empfindungen (nämlich der farblosen, sowie der sogenannten reinen Farben) betrachtete er als Ergebnis psychologischer Verhältnisse, die mit der Namengebung u. a. zusammenhängen. Es ist diese Ansicht, die in besonders scharfem Gegensatze zu der jetzt vielfach vertretenen steht, daß die einfache Prüfung der Empfindungen ohne jedes weitere Hilfsmittel genüge, um ihre „einfachen Elemente" herauszuerkennen. Meines Erachtens lehrt die Heranziehung von Tatsachen auf anderen Sinnesgebieten, daß diese Betrachtung eine jedenfalls sehr unsichere und die Helmholtzsche Vorstellung mindestens insofern eine ganz berechtigte ist, als Empfindungen von komplizierter physiologischer Grundlage unter Umständen den Eindruck von etwas völlig Einheitlichem und typisch Festgelegtem erhalten können.

Kann daher eine Notwendigkeit, die Helmholtzsche Theorie in der erwähnten Weise einzuschränken von dieser Seite her nicht oder doch nicht mit Sicherheit erwiesen werden, so lassen sich in dieser Richtung andere Tatsachen mit größerem Gewicht geltend machen. Die Erfahrung lehrt nämlich, daß der farblosen Empfindung jedenfalls insofern eine ausgezeichnete Bedeutung zukommt, als unter mannigfaltigen Umständen gerade die farbigen Bestimmungen in Wegfall kommen und somit eine farblose Empfindung übrig bleibt. Und zwar gilt dies nicht nur für die Verhältnisse des Dämmerungssehens (wo die Annahmen der Duplizitätstheorie eine einfache Erklärung dafür bieten), sondern es gilt auch für die Bedingungen des Tagessehens. Schon die Veränderungen des Sehens beim Übergang vom Zentrum auf mehr und mehr exzentrische Netzhautteile gehört hierher. Noch wichtiger ist die Tatsache, daß bei Verminderung der Objektgröße die Farbe zum Schwinden gebracht werden kann, wie dies der Normale besonders leicht an exzentrischen Netzhautteilen, der anomale Trichromat an jeder Stelle seines Gesichtsfeldes konstatieren kann. Ferner gehört hierher, daß bei den anomalen Trichromaten die Beschränkung der Einwirkungszeit das Erkennen der Farbe unmöglich macht. Und endlich sei noch an die durch pathologische Vorgänge erworbenen Farbensinnstörungen erinnert, bei denen gleichfalls die Empfindungen ihrer farbigen Bestimmungen verlustig gehen. Läßt sich vielleicht in einem Teil dieser Fälle das Ausfallen der Farbe in der vorhin erwähnten Weise auf Änderungen der Valenzkurven zurückführen, so wird diese Erklärung doch für die räumliche und zeitliche Beschränkung auszuschließen sein. Wir werden hier der Annahme kaum ausweichen können, daß, auch wenn die Tätigkeitsgrade der angenommenen drei Bestandteile des Sehorgans auf ein einer Farbe entsprechendes Verhältnis eingestellt sind, doch, damit die Empfindung wirklich eine farbige wird oder mindestens damit die Farbe als solche erkannt werden kann, noch irgend welche weitere Bedingungen erfüllt sein müssen, Bedingungen, die ihrer ganzen Natur nach eine gewisse Analogie zu der Überschreitung eines Schwellenwertes darbieten.

Auf Grund dieser Verhältnisse darf man es nun wohl für wahrscheinlich halten, daß die von der Helmholtzschen Theorie angenommene Gliederung in drei Bestandteile nicht für das ganze Sehorgan zutrifft, sondern nur für seine peripheren Teile, d. h. diejenigen, die den unmittelbaren Angriffspunkt der Lichtwirkung bilden und eine längere oder kürzere Reihe sich ihnen anschließender, daß dagegen die Enderfolge, die unmittelbaren Substrate der Empfindung von anderer Natur sind, und daß daher an irgend einer Stelle eine Umsetzung jener drei unabhängigen Reizerfolge in Vorgänge anderer Art und Gliederung stattfinde. Von dieser läßt sich das (und meines Erachtens nur das) mit einiger Sicherheit sagen, daß in ihnen die farblose Empfindung eine irgendwie physiologisch ausgezeichnete Bedeutung besitzen wird.

Um für diese Annahme eine kurze Bezeichnung zu fixieren, habe ich sie eine Zonentheorie genannt. Gehen wir von ihr aus, so werden wir keine besondere Schwierigkeit in der Vorstellung erblicken können, daß die optischen Empfindungen durch zwei verschiedene, mehr oder weniger von einander unabhängige Apparate ausgelöst werden können, von denen nur der eine die besprochene dreikomponentige Gliederung besitzt, der andere dagegen als einheitlicher nur eine einsinnige Abstufung seiner Reizerfolge aufweist.

Als einen Gegenstand, der sich zur Zeit einer sicheren Beurteilung entzieht, müssen wir hier die Farbenblindheit der exzentrischen Netzhautteile erwähnen. In vieler Hinsicht liegt es ja ohne Zweifel am nächsten, den mangelhaften Farbensinn der exzentrischen Teile der Farbenschwäche der anomalen Trichromaten zu vergleichen und auf derselben Grundlage zu erklären, nämlich durch Abänderungen der Valenzkurven, eine Vorstellung, die von Fick entwickelt und begründet wurde. Ich gestehe, daß diese Anschauung, mit der ich mich früher nicht befreunden konnte, mir beachtenswerter erscheint, seitdem wir (in den anomalen Trichromaten) solche Alterationen mit Sicherheit kennen gelernt haben. Indessen ist doch zu bedenken, daß wir hiernach für die exzentrischen Zonen auch Abweichungen bezüglich der Rayleigh-Gleichung erwarten müßten, die bis jetzt nicht festgestellt sind. Beständen sie, so könnte über die Richtigkeit jener Auffassung kaum ein Zweifel obwalten. Fehlen sie dagegen und treffen (abgesehen von den Einflüssen des Macularpigments) zentral gültige Gleichungen auch für die Peripherie zu[1], so könnte man, wie ich dies früher befürwortet habe, hier wohl an Modifikationen derjenigen Verhältnisse denken, die bei der Umsetzung der peripheren Vorgänge in die Substrate der Empfindung bestehen. Hier weist das Beobachtungsmaterial noch Lücken auf, die eine spezielle Erörterung oder Abwägung der Möglichkeiten als verfrüht erscheinen lassen.

Als ein weiterer nicht geklärter Punkt, der übrigens mit den eben besprochenen in engem Zusammenhang steht, ist dann die Art der Helligkeitsverteilung zu erwähnen. König hat schon die Aufmerksamkeit auf die Tatsache gelenkt, daß die Verteilung der Helligkeit im (farbig gesehenen) Spektrum, wenn auch nicht sehr genau (das schließen schon die großen individuellen Unterschiede aus), doch annähernd mit den für die Rotkomponente sich berechnenden Reizwerten übereinstimmt. Das gleiche gilt, wie die betreffenden späteren Untersuchungen herausgestellt haben, für die

[1] Daß sich dies so verhalte, ist wohl bis jetzt meist stillschweigend als selbstverständlich vorausgesetzt worden, kann aber wohl kaum als wirklich streng erwiesen gelten. Die Entscheidung ist übrigens auch durch die Einmischung der Stäbchenfunktionen sehr erschwert.

Peripherie- und Flimmerwerte, sowie die Minimalfeldhelligkeiten. Offenbar hängt es damit auch zusammen, daß die Verhältnisse für die Deuteranopen und Deuteranomalen nicht erheblich anders sind, als für den normalen, obgleich die Erregbarkeitsverhältnisse ihrer Grünkomponente doch verschieden sind, während der Protanop oder Protanomale, bei denen die Erregbarkeitsverhältnisse der Rotkomponente abweichen, sich auch in Bezug auf Peripheriewerte usw. ganz anders als der normale verhalten.

Wenn wir an der vorhin berührten Annahme festhalten, daß die in den drei Komponenten sich abspielenden Vorgänge sich zentralwärts in Prozesse anderer Art umsetzen, so müßte man, um diese Erscheinungen zu deuten, irgend eine Hypothese darüber machen, von welcher Natur diese letzteren Prozesse sind und wie sie von jenen bestimmt werden. Wie mir scheint, wird man indessen zurzeit auf einen solchen Versuch als verfrüht verzichten dürfen und zwar schon aus dem Grunde, weil die in dieser Richtung in Betracht kommenden Tatsachen nicht genügend bekannt sind. Vor allem würde es geboten sein, festzustellen, ob in der Tat, wie es den Anschein hat, auch bei Personen mit normalem Farbensinn individuelle Verschiedenheiten in bezug auf diese Verhältnisse stattfinden, wie diese untereinander oder mit sonstigen Unterschieden der Sehorgane[1] zusammenhängen usw. Wichtig ist, wie mir scheint, nur sich klar zu machen, daß der auf den ersten Blick vielleicht nächstliegende Gedanke, wonach jede der Komponenten einen gewissen Beitrag zur Gesamthelligkeit liefern würde, ganz und gar nicht der einzig mögliche ist, vielmehr die verschiedensten anderen Modalitäten des Zusammenwirkens in Frage kommen.

Zusammenfassend können wir schon hier sagen, daß die Helmholtzsche Theorie sich gegenüber demjenigen Tatsachengebiete, das ihr auch ursprünglich in erster Linie zur Grundlage gedient hatte, nämlich den Gesetzen der Lichtmischung, auch nach dem gegenwärtigen sehr erweiterten Stande unseres Wissens, in bemerkenswerter Weise bewährt. Von dem Verhalten des normalen Sehorgans und seinen Beziehungen zu den typisch dichromatischen gibt sie in einfacher und genau zutreffender Weise Rechenschaft. Die etwas verwickelteren Verhältnisse der anomalen Trichromaten lassen sich ihr, wenn auch nicht ganz so einfach, doch in verständlicher Weise einfügen. Und sie gibt uns mindestens die einfachste Form, in der wir die beobachteten Erscheinungen geordnet und übersichtlich ausdrücken können. Müssen wir anderseits betonen, daß sie wohl sicherlich nicht die ganze Bildung des Sehorgans in so erschöpfendem Sinne darstellt, wie Helmholtz dies seinerzeit annahm, so wird doch an einer gewissen Berechtigung ihrer Grundgedanken kaum zu zweifeln sein. Für eine etwas allgemeinere Erwägung der theoretischen Fragen wird später, nach Besprechung einiger anderer Theorien und anderer Gruppen von Tatsachen, der Ort sein.

## 2. Andere Theorien der Licht- und Farbenempfindung.

Wenn Helmholtz eine Erschließung der physiologischen Vorgänge aus der unmittelbar psychologisch gegebenen Beschaffenheit der Empfindungen nicht für zulässig oder wenigstens für äußerst unsicher hielt, so hat die Mehrzahl

[1] In der oben schon erwähnten Arbeit von Frl. v. Maltzew finden sich in dieser Richtung beachtenswerte Andeutungen, die jedoch noch sehr der Vervollständigung und Bestätigung bedürfen.

späterer Theorien des Sehorgans gerade diese Gruppe von Tatsachen zum Ausgangspunkt genommen. Die Ergebnisse einer solchen Betrachtung sind wenigstens in den Hauptpunkten übereinstimmend gewesen, wodurch denn allen diesen Theorien ein gemeinsamer Stempel aufgedrückt worden ist. In erster Linie schreiben sie der der Helligkeit nach abstufbaren, vom Schwarz zum Weiß führenden Reihe der farblosen Empfindungen eine irgendwie ausgezeichnete Sonderstellung zu. Sodann nehmen sie eine ähnlich ausgezeichnete Stellung auch für gewisse Farben in Anspruch, die demgemäß wohl als reine, als einfache oder Grundfarben bezeichnet werden, nämlich Rot, Grün, Gelb und Blau. Dabei kann dann noch bemerkt werden, daß in der Empfindung jede Qualität des einen Paares mit beiden des andern vereinbar erscheint (also Rot mit Blau sowohl wie mit Gelb, Gelb mit Rot sowohl wie mit Grün), während die beiden Bestimmungen jedes Paares sich ausschließen, also Rot und Grün, Gelb und Blau unvereinbar sind. Diese in ihren Grundgedanken sehr alte Vorstellung ist in neuerer Zeit besonders von Aubert entwickelt und vertreten werden und kann als Vierfarbentheorie bezeichnet werden.

Eine experimentelle Prüfung der Vierfarbentheorie ist leider selbst in denjenigen Punkten, die einer solchen wohl zugänglich wären, nur in sehr unzulänglicher Weise ausgeführt worden. Offenbar wäre es von Wichtigkeit zu erfahren, welche (objektiv definierten) Lichter unter geeigneten Bedingungen den Eindruck „reiner“ Farben hervorbringen, und ob auch in dieser Hinsicht zwischen den verschiedenen Beobachtern Übereinstimmung oder Abweichung stattfindet. Untersuchungen dieser Art liegen nur sehr spärlich vor; und es hängt damit zusammen, daß zwischen den Vertretern der Vierfarbentheorie sogar wegen eines Punktes von fundamentaler Bedeutung die Meinungen auseinandergehen. Aubert nämlich war der Meinung, und dieser hat sich auch Hering (seinen sogleich zu besprechenden theoretischen Anschauungen gemäß) angeschlossen, daß ein rein rotes und ein rein grünes Licht, in passenden Mengenverhältnissen gemischt, ihre farbigen Qualitäten gerade aufheben, also ein farbloses Gemisch ergeben, daß also reines Rot und reines Grün komplementäre Farben sind. Im Gegensatz hierzu hat Ladd-Franklin[1] (in Übereinstimmung übrigens mit einem von Fick[2] schon vor langer Zeit ausgesprochenen Gedanken), betont, daß rein rot und rein grün erscheinende Lichter zusammen einwirkend nicht farblos, sondern gelb aussehen. Für eine weitere physiologische Ausgestaltung der Vierfarbentheorie ergeben sich hieraus natürlich auch große Unterschiede, auf die wir unten zurückkommen.

Die Vierfarbentheorie hat in den letzten Jahrzehnten große Beachtung, vor allem in der speziellen Form gefunden, die ihr E. Hering[3] gegeben hat. Ihm zufolge setzt sich das Sehorgan aus drei Bestandteilen zusammen, von denen der eine (die „schwarz-weiße Sehsubstanz“) wesentlich die farblosen Helligkeitsempfindungen bestimmen würden, während die beiden anderen (rotgrüne und gelb-blaue Sehsubstanz) die Träger der farbigen Qualitäten wären. Des weiteren wird angenommen (die Theorie knüpft hiermit an ganz allgemeine biologische Gedanken Herings an), daß in jeder dieser Substanzen gleichzeitig

[1] Zeitschrift für Psychologie usw. **4**, S. 211. 1893. Artikel Vision in Baldwins Dictionary of Philosophy and Psychology.

[2] Pflügers Archiv **47**, S. 285. 1890.

[3] Sitzungsberichte der Wiener Akademie, Mathem.-naturw. Kl. **69**, S. 131. 1874.

Vorgänge entgegengesetzter Art ablaufen, die Hering als assimilatorische und dissimilatorische (*A*- und *D*-Vorgänge in üblicher Abkürzung) bezeichnet. Das Verhältnis dieser entgegengesetzten Vorgänge soll nun für die Empfindung bestimmend sein. Ihr Gleichgewicht in einer der farbigen Sehsubstanzen würde bedingen, daß die Empfindung weder die eine noch die andere Farbe des betr. Paares aufweist (also weder gelb noch blau, weder rot noch grün ist). Beim Gleichgewicht in beiden farbigen Sehsubstanzen ist die Empfindung farblos. Das Gleichgewicht in der schwarz-weißen Sehsubstanz entspricht einem bestimmten mittleren Grau. Weiß, Rot und Gelb in zunehmender Helligkeit resp. Sättigung entspricht dem steigenden Übergewicht der drei *D*-Vorgänge, Schwarz, Grün und Blau ebenso dem Übergewicht der *A*-Vorgänge. Hering hat für diese ganze Anschauung den bezeichnenden Namen einer Theorie der Gegenfarben gewählt.

Die hiernach anzunehmende Art, wie die verschiedenen Lichter auf die einzelnen Sehsubstanzen wirken, ist ohne weiteres ersichtlich. Auf die schwarz-weiße Sehsubstanz müßten alle Lichter im dissimilierenden (Weiß-)Sinne wirken, wenn auch in verschiedenem, von der Wellenlänge abhängendem Grade. Auf die gelb-blaue Sehsubstanz dagegen wirken die langwelligen Lichter bis zum reinen (weder ins gelbe noch ins blaue ziehenden) Grün im dissimilierenden (Gelb-)Sinne, die kürzerwelligen von eben diesem Punkte an dagegen im assimilierenden (Blau-)Sinne. Für die rot-grüne Substanz findet *D*-Wirkung am langwelligen Ende des Spektrums statt, bis zum reinen Gelb, von da bis zum reinen Blau *A*-Wirkung, jenseits dieses Punktes dagegen im Violett wieder *D*-Wirkung. Die rein gelben und blauen Lichter würden auf die rot-grüne, die rein roten oder grünen Lichter auf die gelb-blaue Sehsubstanz gar nicht wirken.

Besonders beachtenswert ist dabei zugleich die Art, wie die Reizempfänglichkeit des Sehorgans und ihre Abhängigkeit von den auch die Empfindung bestimmenden Vorgängen aufgefaßt wird. Überwiegt die dissimilierende Zerstörung, so vermindert sich der Materialbestand und es ändert sich daher die „Stimmung“ in dem Sinne, daß die Wirkung der *D*-Reize vermindert, die der *A*-Reize vermehrt wird, entgegengesetzt beim Übergewicht der *A*-Vorgänge. So regulieren sich die Zustände in der Art einer Selbststeuerung: als Dauerzustand ist stets nur der eines Gleichmaßes von *D*- und *A*-Vorgängen möglich, also ein Grau bestimmter Helligkeit und ohne Farbe.

Was nun die uns hier beschäftigenden Anomalien des Farbensinns anlangt, so führt die Vierfarbentheorie dazu, für die dichromatischen Farbensysteme ein Fehlen des Rot-Grün-Sinnes anzunehmen, woraufhin man diese beiden Formen unter der Bezeichung Rot-Grün-Blindheit zusammenfaßte. Auch Hering schloß sich dieser Auffassung mit der Annahme an, daß in allen Fällen die rot-grüne Sehsubstanz fehle. Die damals bereits in gewissem Umfange wohlbekannten Unterschiede der beiden jetzt als Protanopen und Deuteranopen bezeichneten Typen versuchte er als Folge physikalischer Verhältnisse (Absorption des Lichtes in den gefärbten Augenmedien, besonders dem Pigment der Macula) zurückzuführen. Diese Annahme, schon mit den damals bekannten Tatsachen nicht wohl vereinbar, hat sich durch die späteren Untersuchungen als durchaus unangängig herausgestellt. Der Unterschied des protanopischen und deuteranopischen Sehorgans ist gerade gegenüber den langwelligen Lichtern so groß, dabei so typisch fixiert, endlich für die Netzhautperipherie genau ebenso aus-

geprägt wie für das Zentrum, daß an eine solche Erklärung nicht gedacht werden kann.[1]

Ebensowenig kann man den hier vorliegenden Unterschied der dichromatischen Formen mit den Unterschieden in Parallele stellen, die sich auch innerhalb der Farbentüchtigen finden, wie dies neuerdings Tschermak versucht hat.[2]

Dieser stellt sich vor, daß es unter den Farbentüchtigen ebenso wie unter den Rot-Grünblinden zwei Typen gebe, von denen die eine durch eine relativ gute, die andere durch eine relativ schlechte „Ausnutzung der langwelligen Lichter" charakterisiert wäre. Allein ein normales, d. h. farbentüchtiges Sehorgan, das die langwelligen Strahlen in ähnlicher Weise „schlecht ausnützte" wie das protanopische gibt es nicht. Trichromatische Farbensysteme, die die langwelligen Strahlen vorzugsweise schlecht ausnutzen, sind vielmehr die protanomalen. Ganz ebenso kennen wir wohl eine Form trichromatischer Sehorgane, die von der Mehrzahl in anderer Weise abweichen, einer Weise, die übrigens nur in sehr bedingtem Sinne jener entgegengesetzt werden darf und nicht etwa durch eine ganz besonders gute Ausnutzung der langwelligen Lichter oder eine schlechtere der kurzwelligen zu charakterisieren ist. Auch diese Abweichung aber ist mit einer Verschlechterung des Farbensinns verknüpft und führt in stetigem Übergang zum deuteranopischen System.

Wir kennen also nicht zwei Formen normaler Farbensysteme zwischen denen ein Unterschied ähnlicher Art wie zwischen den beiden Dichromaten existierte. Sondern wir kennen nur ein normales Farbensystem, das zweier Modifikationen fähig ist. Von diesen ist die eine, wenn wir diesen Ausdruck einmal benutzen wollen, durch die schlechte Ausnutzung der langwelligen Lichter charakterisiert, während diese Erscheinung bei der anderen fehlt; beide aber bedingen Störungen des Farbensinns, bei höheren Graden die Dichromasie.

Es kann gegenwärtig also kein Zweifel darüber obwalten, daß die Vierfarbentheorie hier versagt, und daß speziell die Deutung, die Hering für den Unterschied der mehrgenannten beiden Arten der Farbenblindheit versuchte, mit den Tatsachen nicht vereinbar ist. Dies schließt natürlich nicht aus, daß die Annahmen der Theorie, insbesondere der alte Grundgedanke der Vierfarbenlehre, in irgend einem Sinne doch zutreffen können. Sicher ist nur, daß die Anomalien des Farbensinnes mit Notwendigkeit auf irgend welche in der Theorie nicht berücksichtigte Verhältnisse hinweisen, somit eine Einschränkung oder Ergänzung derselben fordern.

Ebenso unglücklich ist die Theorie der Gegenfarben bei der Deutung der totalen Farbenblindheit gewesen. Hering glaubte ursprünglich, daß man in diesen Fällen ein auf die schwarz-weiße Sehsubstanz beschränktes, also beider farbigen Sehsubstanzen ermangelndes Sehorgan vor sich habe. Er glaubte demgemäß in der Ermittelung der Reizwerte für ein solches Auge die Weißvalenzen feststellen und er glaubte eine Bestätigung dieser Annahme darin finden zu können, daß das normale Sehorgan, dunkeladaptiert und bei schwachen (unter den Farbenschwellen bleibenden) Lichtern mit größter Annäherung ebenso sieht. Abgesehen davon, daß zahlreiche Eigentümlichkeiten des total farbenblinden Auges hierbei durchaus unverständlich werden, scheitert diese Vorstellung schon daran, daß für Lichterpaare, die dem Dichromaten unter den Bedingungen des Tagessehens gleich erscheinen, diese Weißvalenzen total verschieden sein können, daß die äußerste Netzhautperipherie helladaptiert und bei hohen Lichtstärken, zwar auch durchweg farblos, aber mit einem ganz anderen

[1] Über die besonderen Umstände der Untersuchung, durch die Hering hier irregeführt worden ist, s. v. Kries, Zeitschrift für Psychologie usw. **13**, S. 301. 1897.

[2] Ergebnisse der Physiologie I, 2.

Helligkeitsverhältnis der verschiedenen Lichter sieht, überhaupt an der ganzen Reihe von Tatsachen, die uns nötigen, das Dämmerungssehen als Funktion eines besonderen Bestandteils im Sehorgan aufzufassen.[1]

Hat sich die Theorie hier in noch direkterer Weise mit den Tatsachen in Widerspruch gestellt, so kann sie dieser allerdings durch eine einfache und weniger bedeutungsvolle Modifikation entgehen. Sie würde sich nur durch die Annahmen der Duplizitätstheorie zu ergänzen haben und es würden dann nicht die Dämmerungswerte, sondern die Peripheriewerte als Maß für die Wirkung auf die schwarz-weiße Sehsubstanz, als „Weißvalenzen" zu betrachten sein.

Eine Ergänzung der Theorie in den hiernach erforderlichen Richtungen ist namentlich von G. E. Müller versucht worden.[2] Dieser hat, von den Grundvorstellungen der Vierfarbenlehre ausgehend, eine Theorie des Sehorgans entwickelt, welche teils diesen Tatsachen, teils auch denen der Umstimmung Rechnung zu tragen bestimmt war. Er ist dabei von der gewiß berechtigten Erwägung ausgegangen, daß, wenn die letzten Substrate der Empfindung sich in einer der Vierfarbentheorie entsprechenden Weise auffassen lassen, die Einrichtungen des peripheren Sinnesapparates daneben von anderer Beschaffenheit sein können. In bezug auf diese hat dann Müller eine Reihe von Vorstellungen entwickelt, die geeignet scheinen konnten, die damals (1897) bekannten Tatsachen verständlich zu machen, aber bereits sehr kompliziert ausfielen. Eine ausführliche Darstellung der Müllerschen Theorie (die ohnehin über die hier gestecken Grenzen hinausführen würde) darf um so mehr verzichtet werden, als die Theorie, um sich mit den im letzten Jahrzehnt bekannt gewordenen Tatsachen abzufinden, wohl noch weiterer Umgestaltungen bedürfen würde.

Als eine, in der Hauptsache allerdings negative Weiterführung der Theorie der Gegenfarben darf ferner hier der oben schon berührte Versuch Tschermaks angeschlossen werden. Dieser läßt, wie dort erwähnt wurde, Herings physikalische Erklärung für den Unterschied der Protanopen und Deuteranopen fallen, und spricht von einer relativ besseren oder schlechteren Ausnutzung der langwelligen Lichter. Einen Versuch, den Grund dieser ungleichen Ausnutzung anzugeben oder die speziellen Beziehungen der verschiedenen Farbensysteme auf dieser Basis zu deuten, hat Tschermak nicht gemacht.[3] Daß er übrigens in dieser letzteren Hinsicht von gewissen den Tatsachen nicht entsprechenden Anschauungen ausging, wurde vorhin schon erwähnt.

---

[1] Die Annahme, daß die Wirkungen auf die schwarz-weiße Sehsubstanz unter allen Umständen den Dämmerungswerten entspreehen, trat auch mit der Helligkeitsverteilung im farbig gesehenen Spektrum in einen gewissen Widerspruch, einen Widerspruch, den Hering durch seine Lehre von der spezifischen Helligkeit der Farben zu beseitigen versuehte. Ein Eingehen hierauf erübrigt sich, da die Annahme, von der hierbei ausgegangen wurde, aus den oben angeführten Gründen nicht mehr ernsthaft in Frage kommt. Die Tatsache, daß die Helligkeitsverteilung im farbig gesehenen Spektrum nahezu dieselbe ist, wie sie beim farblosen Sehen mit helladaptierten exzentrischen Netzhautteilen stattfindet, läßt erkennen, daß die Farben die Helligkeit nur sehr wenig beeinflussen.

[2] Zeitschrift für Psyehologie usw. **10**, S. 1 und 321 **14**, S. 1 und 161.

[3] Tschermak weist lediglich auf die Möglichkeit hin, daß es sich hier um Beschaffenheiten peripherer, den eigentlichen Sehsubstanzen vorgeschalteter Gebilde handeln möge. Er schließt sich hiermit einem Gedanken an, den Hering selbst gelegentlich berührt aber niemals ernsthafter in Betracht gezogen hat, den dagegen schon Donders wirklich in Anwendung zu bringen versuchte, und den ieh seit meinen ersten Publikationen vertreten habe. (Die Gesichtsempfindungen und ihre Analyse. 1882. S. 163 f.)

Dagegen hat Schenck[1] versucht, die Annahmen der Helmholtzschen Theorie in gewisser Weise weiter zu entwickeln, und zwar die in ihr angenommene Gliederung des Sehorgans in drei Bestandteile durch Vorstellungen über ihre Entwickelung verständlich zu machen. Ebenso wie die Stäbchen enthalten nach diesen Anschauungen auch die Zapfen ursprünglich eine einheitliche, von der der Stäbchen nur unerheblich verschiedene Substanz, deren durch Licht hervorzurufende Zersetzung gleich jenen eine farblose Helligkeitsempfindung auslöst. Diese Substanz, die ursprünglich auch ähnlich der der Stäbchen für langwelliges Licht sehr wenig empfänglich ist, erfährt zunächst eine „Panchromatisierung" genannte Veränderung, vermöge deren sie (ähnlich wie photographische Platten) auch durch langwelliges Licht relativ stark affizierbar wird. Sie erfährt sodann zunächst eine Differenzierung oder Teilung in einen Blau- und Gelbbestandteil, alsdann der letztere nochmals eine ähnliche Teilung in Rot- und Grünbestandteil. Für Anomalien des Farbensinnes ergibt sich so eine Reihe von Möglichkeiten. Das vollständige Fehlen des Zapfenapparates bedingt die gewöhnliche Form der totalen Farbenblindheit. Andere Formen resultieren teils aus dem Ausbleiben der Panchromatisierung, teils namentlich aus dem Ausbleiben der Spaltung des Gelbprozesses. Letzteres bedingt dichromatische Sehorgane; und zwar Deuteranopie, wenn die Panchromatisierung eingetreten, Protanopie, wenn auch diese ausgeblieben ist.

Die Theorie ist gewiß geeignet, das Vorkommen zahlreicher Formen des Farbensinnes etwa von der Art der tatsächlich beobachteten in einer ansprechenden Weise vertsändlich zu machen (obwohl es immerhin auffällig bleibt, daß einige der theoretisch zu erwartenden Formen bisher nicht zur Beobachtung gekommen sind). Dagegen scheint mir die Art, wie auf dieser Grundlage die besonderen, zwischen den verschiedenen Farbensystemen bestehenden Beziehungen verständlich gemacht werden, nicht so glatt und einfach, daß man der Theorie, in Ermangelung irgend welcher sie stützender objektiver Beobachtungen einen sehr zwingenden Überzeugungswert zuerkennen könnte. Ich glaube daher von einer detaillierten Wiedergabe und Besprechung der Theorie hier absehen zu sollen.

Der Schenckschen Theorie sehr ähnlich ist die von Ladd Franklin[2] schon vor längerer Zeit entwickelte. Ich habe hier der Schenckschen etwas ausführlicher Erwähnung getan, weil sie sich gerade mit den uns hier beschäftigenden Anomalien des Farbensinnes in besonders eingehender Weise auseinandersetzt. Einige andere Theorien der optischen Empfindungen, deren Interesse mehr nach anderer Seite liegt, werden unten noch kurz berührt werden.

## 3. Die Umstimmungen des Sehorgans.

Obwohl die mannigfaltigen Formen der Anomalien des Farbensinnes gewiß in erster Linie geeignet sind, uns einen Einblick in die normale Bildung des Sehorgans zu geben und auch weitaus am meisten in dieser Hinsicht studiert und erörtert worden sind, so gibt es doch noch einige andere Gruppen von Erscheinungen, die eine Betrachtung in gleichem Sinne zulassen. Auch auf diese soll hier noch kurz eingegangen werden, schon um die hierher gehörigen, durch neuere Untersuchungen ermittelten Tatsachen, anzuführen. Ich erwähne hier

[1] Pflügers Archiv **118**, S. 129. 1907.
[2] Zeitschrift für Psychologie usw. **4**, S. 211. 1893.

zunächst die Erscheinungen der Umstimmung des Sehorgans.[1] Während die Grundzüge dieser Erscheinungen seit lange bekannt sind, übrigens auch nach allen Theorien in befriedigender Weise verständlich gemacht werden können, hat sich die detaillierte Erforschung namentlich an gewisse theoretisch interessierende Fragen angeschlossen. Von diesen ist die erste, die nach der „Persistenz der optischen Gleichungen", die Frage, ob zwei (objektiv ungleiche) Lichtgemische, die bei einem beliebigen Zustande des Sehorgans gleich erscheinen, dies auch bei jedem anderen Zustande tun, oder ob ihr Aussehen durch Zustandsänderungen des Sehorgans ungleich werden kann. Schon früher besprochene Tatsachen lehren, daß diese Frage für alle mit Stäbchen und Zapfen ausgerüsteten Netzhautteile in letzterem Sinne zu beantworten, die Persistenz zu verneinen ist. Wir können, wie dort erwähnt, sehr leicht Lichtgemische herstellen, die unter den Bedingungen des Tagessehens gleich erscheinen, aber völlig ungleiche Dämmerungswerte besitzen. Solche werden also, wie dort besprochen, durch Adaptation ungleich, oft in enormen Betrage. Dagegen ist nach allem was wir wissen als sehr wahrscheinlich anzunehmen, daß für die stäbchenfreie Stelle des deutlichsten Sehens solche Änderungen nicht oder doch nur in so geringem Betrage vorkommen, daß ihre einwandfreie Feststellung bis jetzt nicht gelungen ist.[2]

Auch für die dem Dämmerungssehen dienenden Bestandteile des Sehorgans ändern sich, wie die Versuche von Stegmann[3] und Beobachtungen an total Farbenblinden zeigen, die Helligkeitsverhältnisse verschiedener Lichter mit wechselnder Adaptation nur wenig. Wir dürfen daher annehmen, daß eine Persistenz der optischen Gleichungen zwar keineswegs für das Sehorgan in toto, wohl aber für jeden seiner beiden Bestandteile, wenn nicht mit absoluter Genauigkeit, doch mit großer Annäherung besteht.

In betreff der Art, wie der Reizerfolg durch den jeweiligen Zustand des Sehorgans resp. seiner Bestandteile beeinflußt wird, hatte Helmholtz (im Anschluß an Fechner) die Vermutung ausgesprochen, daß „die Ermüdung der Sehnervensubstanz die Empfindung neu einfallenden Lichtes ungefähr in dem Verhältnis beeinträchtigt, als wäre die objektive Intensität dieses Lichtes um einen bestimmten Bruchteil ihrer Größe vermindert." (S. o. S. 200.)

Hiernach wäre also der Erfolg einer Stimmungsänderung in einem Bestandteile des Sehorgans derselbe, wie wenn alle ihn treffenden Reize mit einem bestimmten Koeffizienten multipliziert würden. Auch Hering hat übrigens diese Betrachtung wenigstens seinen älteren Darstellungen zugrunde gelegt und angenommen, daß für die Reizerfolge ein Produkt aus der Stärke des einwirkenden Lichtes und einem von der Stimmung des Sehorgans abhängigen Koeffizienten maßgebend sei.

Ich habe diesen Satz als Koeffizientensatz bezeichnet. Was die Prüfung und Gültigkeit dieses Satzes anlangt, so muß man zunächst im Auge behalten, daß die ihm zugrunde liegende Annahme über die funktionelle Bedeutung der Stimmung jedenfalls nur geeignet ist, das Verhalten eines einheitlichen

[1] Ich benutze diesen Ausdruck statt der von Helmholtz benutzten Namen der Ermüdung und Erholung, weil er der allgemeinere ist und der theoretischen Auffassung in keiner Weise vorgreift.

[2] Vgl. über die diese Verhältnisse betreffenden Ermittelungen und Kontroversen Nagels Handbuch der Physiologie III, S. 210 f., sowie die dort angeführte Literatur.

[3] S. o. S. 328.

Gebildes, also jedes einzelnen im Sehorgan etwa vorhandenen Bestandteils darzustellen. Hiernach läßt sich schon erwarten, daß der Satz überall da nicht zutreffen wird, wo die Funktionen des Dämmerungs- und Tagessehens kombiniert ins Spiel kommen. Denn hier haben wir es mit den beiden, im allgemeinen jedenfalls verschiedenen Stimmungsänderungen des einen und andern Bestandteils zu tun. In der Tat fand denn auch Bühler[1], daß durch Dunkeladaptation die Erfolge schwacher Lichter in erheblich stärkerem Betrage vermehrt werden als diejenigen intensiver. Will man also zwei aneinander stoßende ungleich gestimmte Netzhautstellen derart belichten, daß sie gleiche Helligkeitseindrücke ergeben, so muß man das Verhältnis der beiden objektiven Helligkeiten mit steigenden absoluten Intensitäten kleiner machen (der Eins nähern). Und ist die Gleichung für ein schwaches Lichterpaar eingestellt, so wird bei proportionaler Vermehrung beider das (die ermüdete Stelle treffende) stärkere Licht zu hell erscheinen. Das gleiche ist neuerdings von Dittler und Orbeli angegeben worden.[2]

Wenn Wirth[3] in scheinbarem Gegensatz zu den Befunden von Dittler und Orbeli den Koeffizientensatz innerhalb ziemlich weiter Grenzen gültig fand, so mag das wohl darin seine Erklärung finden, daß er mit helladaptiertem Auge und vielleicht auch stärkeren reagierenden Lichtern gearbeitet hat. Die theoretisch eigentlich interessierende Frage, wie die Verhältnisse für die einzelnen Bestandteile des Sehorgans liegen, ob hier der Koeffizientensatz annähernd zutrifft oder ob und in welchem Sinne Abweichungen davon stattfinden, entzieht sich also wohl zurzeit noch einer ganz sicheren Beurteilung. Es würde zu ihrer Beantwortung wohl unerläßlich sein, die Prüfung auf sehr kleine, direkt fixierte Felder und hohe Lichtstärken zu beschränken.

Was die spezielleren Erscheinungen anlangt, so ist hier zunächst eine Tatsache nachzutragen, die sich auf die Einwirkung farblosen Lichts bezieht. Ermüdet man bei helladaptiertem Auge eine Netzhautstelle mit weißem Licht und prüft sie mit farbigen reagierenden Lichtern, so findet man, daß, um von ihr und der benachbarten unermüdeten den gleichen Eindruck (namentlich gleiche Farbensättigung) zu erhalten, Lichter von verschiedener Intensität aber nahezu der gleichen qualitativen Zusammensetzung, erforderlich sind. Die durch farbloses Licht ermüdete Netzhautstelle muß also, wenn für sie behufs der Gleichheit die dreifache Menge weißen Lichts erforderlich ist, wie auf den Nachbarteilen, annähernd auch mit der dreifachen Menge des farbigen Lichtes gereizt werden. Die Ermüdung mit farblosem Licht scheint also auch die für die farbigen Bestimmungen der Empfindung in Betracht kommenden Reizerfolge zu modifizieren.[4]

Auch über die Erscheinungen der Umstimmung durch farbige Lichter liegen eine Anzahl neuerer Ermittelungen vor. Prüft man farbenermüdete

[1] Beiträge zur Lehre von der Umstimmung des Sehorgans. Diss. Freiburg 1903.

[2] Pflügers Archiv **132**, S. 338. 1910. Die Versuchsbeschreibung dieser Autoren läßt allerdings nicht erkennen, ob die Bedingungen von der Art waren, daß eine Mitwirkung des Dämmerungsapparates angenommen werden darf, schließt dies aber jedenfalls nicht aus.

[3] Wundt, Philosoph. Studien **16** (4), **17** (3) und **18** (4).

[4] v. Kries, Berichte der Freiburger Naturf. Gesellschaft 1894. Wirth, Archiv f. Psychologie I, S. 49, ist zu dem gleichen Ergebnis gelangt. Dagegen haben in jüngster Zeit Dittler und Richter bei ähnlichen Versuchen entgegengesetzte Resultate erhalten, ein vorderhand noch nicht aufgeklärter Widerspruch. Zeitschr. für Sinnesphysiologie **45**, S. 1. 1910.

Netzhautstellen mit andersfarbigen reagierenden Lichtern, so findet man ihr Aussehen in dem Sinne verändert, daß sie der Komplementärfarbe des ermüdenden Lichtes angenähert erscheinen. In dieser Richtung verdanken wir Hess[1] eine Reihe messender Bestimmungen, die lehren, daß diese Änderungen sehr beträchtlich sind. Auf blau-ermüdeter Stelle sah ihm ein reagierendes grünes Licht (517 $\mu\mu$) so aus, wie ein nur wenig grünliches Gelb Vergleichslicht (565 $\mu\mu$). Ich fand für mich[2] das Aussehen eines gelben reagierenden Lichtes nach Rotermüdung mit einem Grüngelb (556 $\mu\mu$), nach Grünermüdung mit Orange (605 $\mu\mu$) übereinstimmend. Daß, wie schon Helmholtz angegeben hatte, alle reinen Lichter durch vorgängige Ermüdung mit der komplementären Farbe einen sehr beträchtlichen Zuwachs an Sättigung erfahren, ist wiederholt bestätigt worden[3], und es gilt insbesondere auch für die Lichter der langwelligen Spektralhälfte und auch bei hohen Intensitäten des reagierenden Lichtes.

Prüft man die Erscheinungen so daß das ermüdende Licht auch zugleich als reagierendes benutzt wird, so erhält man Aufschluß über die scheinbaren Veränderungen, die einfarbiges Licht bei längerer Betrachtung erfährt. Es büßt dabei, wie bekannt, an Sättigung ein; die meisten Lichter erleiden zugleich eine gewisse Änderung des Farbentons. Nach den Beobachtungen Voestes[4] erscheinen nach längerer Fixation langwellige Lichter (bis 560 $\mu\mu$) einem Vergleichslicht von kleinerer Wellenlänge, Lichter von 560—500 $\mu\mu$ einem von größerer Wellenlänge übereinstimmend; beide nähern sich also dem Gelb. Lichter von 500 bis 460 $\mu\mu$ erscheinen wieder einem kürzer-welligen Vergleichslichte übereinstimmend, erleiden also eine Annäherung an Blau.

Während, wie vorhin bemerkt, sehr verschiedenartige theoretische Vorstellungen genügend sind, uns die Umstimmungserscheinungen in ihren Grundzügen und qualitativ verständlich zu machen, ist es bis jetzt nicht gelungen, sie in ihren Details und quantitativ befriedigend theoretisch zu deuten. So ist denn auch diese ganze Gruppe von Erscheinungen vorläufig wenig geeignet uns in bezug auf fundamentale Fragen, die die Gliederung des Sehorgans oder seinen Aufbau aus einzelnen Bestandteilen betreffen, Aufschlüsse zu geben.

Die Helmholtzsche Annahme einer Ermüdung, die für die einzelnen Komponenten unabhängig, für jede nach Maßgabe ihrer Tätigkeit, Platz greifen würde, stößt auf Schwierigkeiten im Hinblick auf den starken Sättigungszuwachs, der auch für spektrale Lichter durch eine Ermüdung mit der komplementären Farbe erzielt werden kann. Wenigstens gilt dies, wenn man in bezug auf die Komponenten die aus den Farbensinn-Anomalien sich ergebenden Annahmen macht. Und ob diese Schwierigkeiten sich bei anderen Annahmen in Betreff der Komponenten würden beseitigen lassen, ist mindestens zweifelhaft.

Hering hat, wie erwähnt, ursprünglich die Stimmungen (in Übereinstimmung mit den Koeffizientensatz) so aufgefaßt, daß für den Reizerfolg ein Produkt aus Reizstärke und einem von der Stimmung abhängigen Koeffizienten maßgebend sein sollte. Später hat er (wie vorher schon Hess) dem die Formulierung substituiert, daß jedes Licht durch die Farbenumstimmung einen gewissen Betrag an gegensinniger Valenz erhalten soll, eine Vorstellung, die an

---

[1] Hess, Archiv f. Ophth. **39** (2), S. 45.
[2] v. Kries, Nagels Handbuch der Physiologie III, S. 215.
[3] Hess, a. a. O. v. Kries, Nagels Handbuch der Physiol. III, S. 214. 220.
[4] Voeste, Zeitschrift f. Psychologie usw. **18**, S. 257.

sich keine ganz befriedigende genannt werden kann. In allen Fällen sind irgendwelche Ergänzungen der Theorie erforderlich, um die Unabhängigkeit der optischen Gleichungen von der Stimmung des Sehorgans zu erklären.[1] Und auf positive Schwierigkeiten stößt die Theorie gegenüber den vorhin erwähnten Tatsachen, die lehren, daß durch Weißermüdungen auch die Substrate der farbigen Bestimmungen in ihrer Erregbarkeit herabgesetzt werden.

## 4. Zeitliche Verhältnisse der Reizerfolge.

Beträchtlich verwickelter als vormals angenommen, haben sich die zeitlichen Verhältnisse der Erregungsvorgänge herausgestellt, in betreff derer wegen mancher theoretischer Beziehungen ein Überblick der neueren Untersuchungen gleichfalls hier angeschlossen werden mag.

Für den Erfolg eines einmaligen kurzdauernden Reizes ergaben sich eigentümliche Verhältnisse schon aus der lange bekannten Erscheinung des sogen. Purkinjeschen (positiv-komplementären) Nachbildes. Die systematische Untersuchung der Wirkung kurzer Lichtreize hat dann gezeigt, daß dieses nur einen Teil einer längeren Vorgangsreihe ausmacht.

In methodischer Beziehung sei hier nur erwähnt, daß man in doppelter Weise zu Werke gegangen ist. Man kann entweder einen kurzdauernden Reiz auf eine Netzhautstelle einwirken lassen und die zeitliche Folge der sich danach ergebenden Empfindungsstadien beobachten. Oder man kann (bei ruhendem Auge) ein Lichtbild über die Netzhaut hingleiten lassen. Auch in diesem Falle wird jeder Punkt der Netzhaut für eine kurze (durch Größe und Geschwindigkeit des Bildes sich bestimmende) Zeit belichtet, aber die verschiedenen Teile nacheinander. Man erblickt daher die verschiedenen Phasen des Vorgangs zugleich, aber räumlich auseinandergelegt, was die Auffassung und Beurteilung sehr erleichtert.

Die Erscheinungen, die man unter den für eine Sonderung ihrer verschiedenen Teile wohl günstigsten Bedingungen wahrnimmt, sind die folgenden.[2]

Wenn man ein helles Objekt in dem sonst ganz dunklen Gesichtsfelde umlaufen läßt, so kann man unter geeigneten Umständen die folgenden Stadien des ganzen an die kurze Reizung sich anschließenden Prozesses unterscheiden.

1. Das primäre Bild, die voranlaufende Lichterscheinung, den zeitlich ersten und stärksten Erfolg des einwirkenden Lichtes darstellend. Es erscheint an Farbe im allgemeinen übereinstimmend mit derjenigen, die das betreffende Licht auch bei dauernder Einwirkung zeigt; gegenüber dem ruhenden ist es, je nach der Geschwindigkeit der Bewegung, mehr oder weniger in die Länge gezogen.

2. Dem primären Bilde folgt eine dunkle Strecke.

3. An diese schließt sich ein zweites, ein wiederholtes Aufleuchten anzeigendes Bild, welches ich das sekundäre nenne. Es ist bei Benutzung farbiger Lichter schwach, und zwar im allgemeinen zum Vorbilde komplementär

[1] v. Kries, Archiv f. (Anatomie und) Physiologie. Die Triftigkeit dieser Betrachtung ist von Hering mit Unrecht bestritten worden. Vgl. Hering, Pflügers Archiv **42**, S. 497. v. Kries, Archiv f. Physiologie 1887 S. 113, 1888 S. 381.

[2] Ich reproduzicre hier meine kürzlich an anderer Stelle (Nagels Handbuch der Pysiologie III, S. 221) gegebene Darstellung.

gefärbt. Es stellt das dar, was von Purkinje zuerst beobachtet und von späteren Autoren als positiv komplementäres oder Purkinjesches Nachbild bezeichnet worden ist. Sehr scharf einsetzend und in der Regel nicht von sehr langer Erstreckung bildet dieses die eigenartigste und frappierendste Erscheinung des ganzen Gebietes. Denn es bewirkt bei mäßig schnellem Umlauf den Eindruck eines hinter dem leuchtenden Objekt in bestimmtem Abstande herlaufenden zweiten Objekts von oft recht beträchtlicher Lichtstärke und (wie erwähnt) zum Vorbild etwa komplementärer Färbung. Diese Form der Beobachtung hat dann den Anlaß gegeben, die Erscheinungen als recurrent vision (Young, Davis), nachlaufendes Bild (v. Kries), als Ghost (Bidwell), Satellit (Hamaker) zu benennen. Sie ist (für ein umlaufendes blaues Objekt) in der Figur 2 der Tafel III dargestellt.

4. Das sekundäre Bild schließt hinten unscharf begrenzt ab und wird von einem zweiten Dunkelintervall gefolgt. Diesem schließt sich

5. eine nochmalige Erhellung an, die ich mit Snellen und Bosscha das tertiäre Bild nenne. Es ist farblos oder dem primären schwach gleich gefärbt. Es setzt nicht scharf ein, sondern stellt ein allmähliches Anschwellen und Wiederabsinken der Helligkeit dar, das sich über einige Sekunden erstreckt. Ist dieser Teil der Erscheinung gut ausgebildet, so stellt es bei denjenigen Umlaufsgeschwindigkeiten, die für die Beobachtung des sekundären Bildes die günstigsten sind (ein Umlauf in 1,5 bis 3 Sekunden), einen die ganze Kreisbahn ausfüllenden Lichtnebel dar. Es ist dann besser, um den ganzen Ablauf der Erscheinung beobachten zu können, das Objekt nur einen oder nur einen Teil eines Umlaufs machen zu lassen.

6. Als letzte Phase schließt sich dann der vorigen (wiederum ohne scharfe Abgrenzung) eine Verdunklung an, die die vom hellen Objekte durchlaufene Bahn als tiefschwarzen Streifen kenntlich macht. Da das primäre Bild weitaus am hellsten, das sekundäre erheblich schwächer als dieses, aber dem tertiären wieder beträchtlich überlegen erscheint, so ergibt sich, daß, wenn gewisse Stärken des einwirkenden Lichtes geeignet sind, die Erscheinungen in der eben geschilderten Weise zu zeigen, bei geringerer Stärke nur primäres und sekundäres Bild sichtbar wird, bei noch geringerer auch das letztere schwindet. Ferner ist zu bemerken, daß bei der je nach den Umständen wechselnden Erstreckung der einzelnen Bilder das primäre bis an das sekundäre, dieses wieder bis an das tertiäre heranreichen kann, so daß die Dunkelintervalle fehlen; die Erscheinung erhält dann einen wesentlich anderen Charakter und läßt insbesondere die relative Selbständigkeit der hier angenommenen Erregungen nicht mehr deutlich hervortreten. —

Unter den zahlreichen Details können hier nur diejenigen Erwähnung finden, die am sichersten beobachtet sind und theoretisch besonderes Interesse bieten. Was zunächst das primäre Bild anlangt, so zeigt dasselbe häufig gewisse Differenzierungen, die darauf hindeuten, daß die verschiedenen, bei der dauernden Einwirkung eines Lichtes affizierten Teile des Sehorgans beim Einsetzen des Lichtes nicht ganz gleichzeitig in Tätigkeit kommen. Erscheinungen dieser Art sind übrigens unter vielerlei Bedingungen zu beobachten und zum Teil auch lange bekannt. So ist schon im Text (S. 216) angegeben, daß, wenn man eine Scheibe mit schwarzen und weißen Sektoren rotieren läßt, man bei gewissen Geschwindigkeiten die weißen Sektoren sich an ihrem vorauslaufenden Rande rötlich, am hinteren Rande bläulich färben sieht. Es scheint hiernach, als ob

die Rotkomponente etwas schneller als die anderen reagierte, womit übrigens auch die Beobachtungen Kunkels[1] in gutem Einklang sind. Nach der Angabe von Hess[2] erscheint bei bewegten roten Objekten der voranlaufende Rand gesättigter rot, was wohl im gleichen Sinne gedeutet werden kann.

Besonders auffällig werden solche Differenzierungen bei Dunkeladaptation. Man sieht dann (besonders deutlich bei blauem Licht), daß nur der vorauslaufende Rand lebhaft farbig erscheint. An ihn schließt sich ein blasseres Stück an, das in einen weißen Schweif ausläuft. Das primäre Bild erhält alsdann das in Fig. 3 der Tafel III abgebildete Aussehen. Es zeigt sich also, daß die primäre Erregung des Dämmerungssehens derjenigen des Tagessehens mit einer kleinen Verspätung folgt. Auch die seit lange bekannte Erscheinung der sogenannten flatternden Herzen gehört hierher. Sie besteht bekanntlich (S. o. S. 218) darin, daß farbige Papierschnitzel auf einer andersfarbigen Unterlage befestigt, bei kleinen Hin- und Herbewegungen sich auf dieser zu verschieben, d. h. der Bewegung der Unterlage vorauszueilen oder hinter ihr zurückzubleiben scheinen. Andeutungsweise ist die Erscheinung wohl unter sehr vielen Bedingungen zu sehen. Bei weitem am stärksten ist sie, wenn man rote Schnitzel auf dunkelblauem Grunde beobachtet (oder umgekehrt) und zwar bei schwacher Beleuchtung, so daß für das Blau seine Stäbchenwirkung überwiegend in Betracht kommt.

Bringt man auf einer schwarzen Scheibe einen schmalen roten und blauen Streifen in radialer Richtung an, so daß der eine die Fortsetzung des anderen bildet, so ist (bei schwacher Beleuchtung und Dunkeladaptation) sehr leicht zu sehen, wie bei kleinen Drehungen der Scheibe der roten Streifen vorausläuft und der blaue zurückbleibt (vorausgesetzt natürlich, daß man nicht mit dem Auge folgt, sondern die Blickrichtung fixiert ist). Der Betrag dieser Verspätung wird von Mc Dougall[3] auf etwa $^1/_{18}$ Sek. geschätzt.

Das sekundäre Bild setzt etwa $^1/_4$—$^1/_6$ Sek. nach dem primären ein. Von seinen Eigentümlichkeiten ist die bemerkenswerteste die, daß es an der Stelle des deutlichsten Sehens fehlt. Wird es also in der vorhin erwähnten Weise als nachlaufendes Bild beobachtet und läßt man, bei gut fixiertem Auge, das primäre Bild über die Stelle des deutlichsten Sehens hinweggleiten, so findet man, daß das nachlaufende Bild bis in einen kleinen Abstand von dieser heranläuft, dort in sehr eigenartiger Weise unsichtbar wird (wie wenn es in einen Tunnel schlüpfte) um ein Stückchen jenseit des Fixationspunktes wieder aufzutauchen.[4] Die sich hieraus ergebende Folgerung, daß die sekundäre Erregung einer Funktion des Dämmerungsapparates sei, bestätigt sich darin, daß die Helligkeit der nachlaufenden Bilder den Dämmerungswerten der erregenden Lichter entspricht. Bei sehr langwelligen Lichtern ist, jedenfalls bis zu sehr beträchtlicher Lichtstärke, ein nachlaufendes Bild überhaupt nicht zu bemerken. Wir werden hiernach das sekundäre Bild, soweit seine Helligkeit in Betracht kommt, auf eine besondere zeitliche Gestaltung der Stäbchenfunktion zurückführen müssen, während andererseits seine komplementäre Färbung in der in der gleichen Phase bestehenden Umstimmung des Sehorgans ihren Grund haben

[1] Pflügers Archiv **6**, S. 197. 1872.
[2] Pflügers Archiv **101**, S. 226. 1904.
[3] Mc Dougall, Brit. Journal of Psychology I. 1904.
[4] v. Kries, Zeitschrift für Psychologie **12**, S. 83. 1896.

wird.[1] Merkwürdig und bis jetzt nicht erklärbar ist die Art, wie das sekundäre Bild von der Adaptation abhängt. Beginnt man eine Beobachtung mit helladaptiertem Auge und verfolgt ihre Änderungen unter sonst konstanten Bedingungen bei einsetzender und fortschreitender Dunkeladaptation, so bemerkt man, daß das sekundäre Bild für eine Anzahl von Minuten immer deutlicher und schöner wird, an Helligkeit und Ausdehnung gewinnt; dann aber wird es schwerer wahrnehmbar; und nach sehr langer Dunkeladaptation (2 Stunden oder noch mehr) habe ich es überhaupt nicht mehr beobachten können.[2] Das tertiäre Bild stellt sich, da es gleichfarbig ist, als eine zweite, der primären gleichsinnigen Erregung des trichromatischen Apparates heraus, mit der sich jedoch eine nochmalige (also dritte) durch die Stäbchen vermittelte Helligkeitsempfindung zu kombinieren scheint.

Die Details der Erscheinungen gestatten, wie man sieht, mit großer Wahrscheinlichkeit den Anteil, den die beiden Bestandteile des Sehorgans an ihnen haben, auseinander zu halten. Dagegen sind wir zurzeit nicht in der Lage, für die verwickelte zeitliche Gestaltung der Erregungsvorgänge in jedem dieser Teile eine Erklärung zu geben.

Was die Reizerfolge bei länger dauernden Belichtungen anlangt, so sind nach Hess[3] ähnliche oszillatorische Vorgänge sowohl beim Einsetzen wie auch nach dem Aufhören des Lichtreizes zu beobachten. Über die Art, wie beim Beginn des Reizes der Erregungsprozeß ansteigt, insbesondere die Zeit, nach der das Erregungsmaximum erreicht wird, sind messende Versuche schon vor längerer Zeit von Exner[4] angestellt worden.

Er ließ zu diesem Zwecke die Belichtung zweier benachbarter Netzhautstellen mit einem kleinen Zeitintervall einsetzen ($^1/_{50}$—$^1/_{60}$ Sek.) und alsdann beide Belichtungen gleichzeitig abbrechen. Der Zeitpunkt der Unterbrechung kann variiert und somit beide Belichtungen länger oder kürzer gemacht werden, wobei jedoch ihr Unterschied immer derselbe, eben durch das Intervall des Beginns gegebene bleibt. Sind nun die Belichtungsdauern so kurz, daß das Maximum noch nicht erreicht ist, so wird im Moment der Unterbrechung die früher einsetzende Erregung dem Maximum näher, also von höherem Betrage sein. Ist dagegen das Maximum bereits überschritten, so wird die früher begonnene Erregung bereits weiter darüber hinaus, also von geringerem Betrage sein. Exner fand, daß die so ermittelten Anstiegszeiten mit zunehmender Stärke sich verringerten. Bei den von ihm benutzten Intensitäten lagen die Anstiegszeiten zwischen 0,150 und 0,287 Sek. Auch konnte ermittelt werden, wie bei abnehmender Einwirkungszeit des einen Reizes dessen Intensität gesteigert werden muß, damit sie den anderen (von immer gleicher Dauer und Stärke) gleichbleibt, woraus sich die Art des Erregungsanstiegs entnehmen ließ.

[1] Gewisse Abweichungen von der Regel der komplementären Färbung ergeben sich daraus, daß die dem Dämmerungssehen entsprechende Empfindung häufig mehr oder weniger bläulich ist. Daher rührt es, daß die Blaufärbung bei gelben Lichtern besonders ausgeprägt und leicht zu sehen ist. Bei blauen Lichtern findet man dagegen häufig, daß das nachlaufende Bild gleichfarbig erscheint, solange das erregende Licht von geringer Sättigung ist und erst bei großer Sättigung die der Regel folgende Gelbfärbung hervortritt.

[2] Das gleiche fand auch Nagel und verschiedene unserer Arbeitsgenossen, während Hess angibt, daß für ihn die Erscheinung nach sehr langer Dunkeladaptation nicht wesentlich anders als nach kurzer sich verhält.

[3] Pflügers Archiv **101**, S. 226. 1904.

[4] Sitzungsberichte der Wiener Akademie, Math.-naturw. Kl. (2) **58**, S. 601.

Ähnliche Versuche hat Kunkel[1] mit farbigen (spektralen) Lichtern angestellt.

Da die Vergleichung der benachbarten Felder bei solchen kurzen Belichtungen hauptsächlich in der Nachbild-Phase stattfindet, so ist die Korrektheit des Verfahrens an die Annahme geknüpft, daß wenn die Erregungen im Augenblick der Reizunterbrechung gleich sind, sie auch in übereinstimmender Weise abklingen. Die komplizierten zeitlichen Verhältnisse der Erregung bei kurz dauernden Reizen lassen das Zutreffen dieser Voraussetzung mindestens als nicht ganz selbstverständlich erscheinen. Und so sind die Versuche von dieser Seite her wohl mit einer gewissen Unsicherheit behaftet[2]. Auf noch größere Schwierigkeiten stößt man, wenn man die Helligkeit sehr kurzer Lichtreize mit denjenigen dauernd sichtbarer Reize vergleichen will, wie es (gleichfalls zur Ermittelung der Anstiegsverhältnisse) Martius[3] tat. Die Bedingungen der Helligkeitsvergleichung sind hier sehr verwickelt und die Resultate schwankend, wie dies z. B. die Beobachtungen von Watt[4] direkt lehren.

Noch weit mannigfaltigere Erscheinungen erhält man, wenn man die zeitliche und räumliche Disposition der Lichtreize in beliebiger Weise kombiniert, also z. B. Bilder von mehr oder weniger verwickelter Beschaffenheit über die Netzhaut hingleiten läßt, Erscheinungen, die bis jetzt nur teilweise bekannt sind und noch keine Unterordnung unter allgemeine Regeln, geschweige eine sichere theoretische Deutung zulassen. Es mag genügen, als Beispiel hier einen Fall anzuführen, der dadurch besonders merkwürdig ist, daß durch lediglich farblose Objekte zufolge der besondern räumlichen und zeitlichen Verhältnisse sehr glänzende Farbenerscheinungen entstehen. Wenn man eine Scheibe von nebenstehender Einrichtung in der Pfeilrichtung einzelne Drehungen von zirka 180° ausführen läßt (am besten mit der Hand, wobei man die passende Geschwindigkeit leicht herausfindet), so sieht man, wie sich an das schwarze Ringstück ein metallisch leuchtender gelbroter Schweif anschließt und ihm nachläuft. Der Schweif wird tiefrot, wenn die Scheibe durch ein

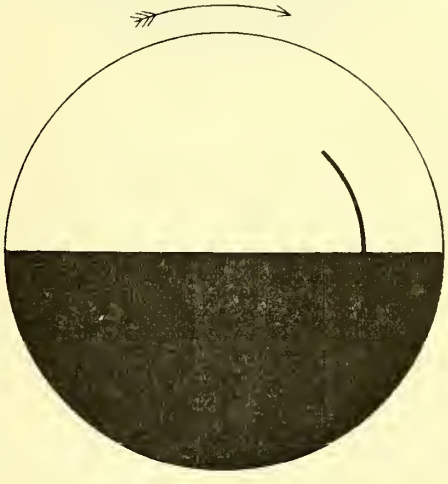


Fig. 79.

[1] Pflügers Archiv **9**, S. 197.

[2] Dagegen kann ich nicht finden, daß diese Ermittlungen mit der vorhin erwähnten Beobachtung von Hess über den oszillatorischen Anfang der Erregungen in Widerspruch ständen oder gar durch diese als unrichtig dargetan wären. Abgesehen davon, daß Exner mit unbewegten, Hess mit bewegten Objekten arbeitete (ein Unterschied, dessen Belanglosigkeit nicht außer Zweifel steht), steht auch gar nichts der Annahme im Wege, daß die Bestimmungen Exners sich auf den ersten Anstieg und ersten Gipfel des Erregungsverlaufs beziehen, wie dies von Exner, gegenüber den Bemerkungen von Hess mit Recht hervorgehoben worden ist. (Pflügers Archiv **103**, S. 167. 1904.)

[3] Beiträge zur Philosophie und Psychologie **1** S. 3.

[4] Watt, Pflügers Archiv **107**, S. 531. 1905.

gelbes Glas betrachtet wird. Läßt man die Scheibe dauernd umlaufen (etwa 4—5 mal in der Sek.), so verbreitet sich die Farbe über die ganze Peripherie, man sieht also einen gelbroten resp. roten Ring, in dem übrigens ein periodischer Wechsel hellerer und dunklerer Stellen bemerkbar ist.

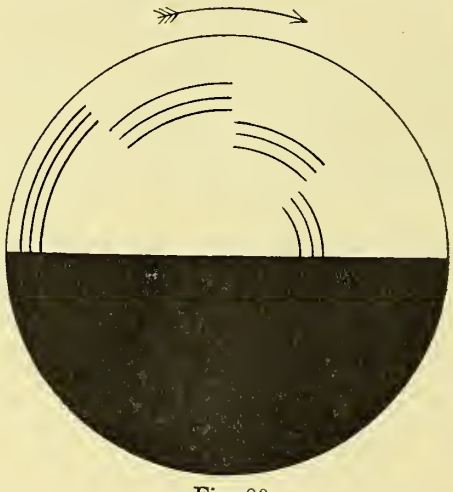


Fig. 80.

Die gelbrote Färbung entsteht hier auf Netzhautstellen, deren (farblose) Belichtung etwas später einsetzt als die der benachbarten Teile.

In etwas anderer Form beobachtet man das gleiche in einem von Bidwell[1] angegebenen Versuch. Man setzt eine Scheibe, die einen Sektorausschnitt von 45° diesem vorauslaufend 180° Schwarz und nachfolgend 135° Weiß hat, in mäßig, schnelle Umdrehung. Durch eine solche Scheibe betrachtet und demgemäß intermittierend sichtbar gemacht, erscheinen schwarze Buchstaben auf weißem Grunde rot. In Kombination mit einer Reihe anderer ist die beschriebene Erscheinung bei der sogenannten Benhamschen Scheibe[2] zu sehen (Fig. 80). Bei langsamer Rotation färben sich hier die inneren Ringe, deren Anordnung mit der vorher besprochenen übereinstimmt, gelbrot, die äußeren dagegen bläulich. Die beiden mittleren lassen keine deutliche Farbe erkennen.

## 5. Überblick des Standes der theoretischen Fragen.

Ein Überblick der hier besprochenen Tatsachen läßt erkennen, daß man von allen die Bildung des Sehorgans betreffenden theoretischen Vorstellungen als relativ am besten gesichert wohl diejenigen Annahmen betrachten darf, die den Inhalt der Duplizitätstheorie ausmachen. Es ist nicht notwendig, auf die oben eingehend besprochenen Verhältnisse nochmals des genaueren zurückzukommen. Nur darauf sei noch hingewiesen, daß sie an ganz bestimmte anatomische und physikalische Tatsachen anknüpft und damit den Vorteil hat, sich in weit anschaulicheren und bekannten, nicht aber in so abstrakten Begriffen zu bewegen, wie es die Helmholtzschen Komponenten oder Herings Sehsubstanzen sind.

Schon hiermit hängt es zusammen, daß wir auf minder sicheren Boden kommen, sobald wir versuchen, uns über die Bildung des trichromatischen Apparates genauere Vorstellungen zu machen. Was diese Verhältnisse anlangt, so kann man zunächst sagen, daß die Anomalien des Farbensinnes und ihre Beziehungen zum normalen dasjenige Gebiet darstellen, in dem es relativ am besten gelungen ist, eine große Fülle von Tatsachen durch Aufstellung einer

[1] Proceedings of the Royal Society London **61**, S. 268.
[2] Ebenda.

Anzahl relativ einfacher und allgemeiner Sätze übersehbar zu machen, und das daher für Vermutungen über die Bildung des Sehorgans die verhältnismäßig sicherste Grundlage abgibt. Auch dürfen wir hinzufügen, daß diese Tatsachen sich an der Hand der Helmholtzschen Theorie, und nur dieser, in relativ einfacher Weise darstellen lassen.

Mag also auch anerkannt werden, daß die Theorie nicht ausreicht, um uns die Verhältnisse des Sehorgans in so durchgreifender und einfacher Weise zu erklären, wie dies vor 50 Jahren den Anschein hatte, so wird man doch auch jetzt bei unbefangener Würdigung der Tatsachen kaum zweifeln können, daß durch ihre Annahmen eine fundamentale Eigentümlichkeit in der Bildung des Sehorgans erfaßt und zutreffend bezeichnet sei. Damit ist die Meinung vereinbar, daß die hier angenommene Gliederung des Sehapparates nur für einen Teil desselben zutreffen wird; dabei kann aber vor allem auch die Frage offen bleiben, was jene Bestandteile eigentlich sind. Und wir können uns der Begriffe der Komponente, der Valenzkurve, der Ausfallserscheinung usw. ruhig bedienen, ohne uns über ihre provisorische Bedeutung einer Täuschung hinzugeben, und ohne außer acht zu lassen, daß spätere Untersuchungen ihnen ihre endgültige Bedeutung geben, vielleicht auch sie durch andere, im Erfolge äquivalente, ersetzen werden.

Was die Vorstellungen der Vierfarbentheorie anlangt, so kann m. E. mit relativ großer Sicherheit nur das behauptet werden, daß die farblosen Empfindungen eine in irgend einem Sinne ausgezeichnete Stellung einnehmen. Ob etwas Ähnliches für die sogen. reinen Farbenempfindungen behauptet werden kann, ist sehr viel zweifelhafter. Aber auch wenn man nur das erstere annimmt, ergibt sich daraus, daß wir die drei Komponenten der Helmholtzschen Theorie als die zutreffende Darstellung nur für eine periphere Bildung des Sehorgans betrachten dürfen, und daß die in ihnen sich abspielenden Vorgänge zentralwärts sich in andere umsetzen, in denen der farblosen Helligkeitsempfindung eine solche ausgezeichnete Stellung zukommt und die vielleicht auch in andern Hinsichten den Annahmen der Vierfarbenlehre entsprechen mögen. Es scheint mir nicht ohne Interesse, daß auf diesen Gedanken einer in verschiedenen Zonen verschiedenen Gliederung des Sehorgans (wenn auch von verschiedenen Ausgangspunkten) die Mehrzahl der theoretischen Erwägungen hingeführt worden ist. Ich habe ihn schon in meinen ersten Veröffentlichungen vertreten. Von der Theorie der Gegenfarben ausgehend, ist G. E. Müller gleichfalls dazu gelangt, für die unmittelbaren Angriffspunkte des Lichts andere Einrichtungen anzunehmen. Ebenso hat Tschermak mit seiner Unterscheidung der Reizempfänger und Empfindungserreger sich prinzipiell auf den Boden einer solchen Auffassung gestellt und auch Schenck hat diese Unterscheidung angenommen und als unerläßlich betont.

Darf man auch hier also wohl noch von einer durch die Tatsachen relativ gut begründeten Vorstellung reden, so geraten wir auf den unsichersten und gänzlich schwankenden Boden mit den Versuchen, die unmittelbaren Substrate der Empfindung physiologisch zu bezeichnen. Gewiß stellt in dieser Hinsicht die Theorie Herings den durch seine allgemein biologischen Beziehungen interessantesten Gedanken dar. Aber gerade unter diesem Gesichtspunkt lassen sich auch schwer-

[1] S. z. B. die Bemerkungen von Fick. Sitzungsberichte der Physik. Med. Gesellschaft Würzburg 1900.

wiegende Bedenken gegen ihn erheben[1]. Niemals ferner ist es glaublich erschienen, daß der Empfindungszustand sich im Hellen wie im Dunkeln durchschnittlich auf denselben Wert (das neutrale Grau) einstellen müsse. Und daß von den Umstimmungen des Sehorgans wenigstens die stärksten durch die Adaptation gegeben, mit der Sehpurpurbildung zusammenhängen, also eine periphere Grundlage haben, nicht direkt auf dem Empfindungsprozeß beruhen, kann doch zurzeit als überaus wahrscheinlich gelten. — Als Hypothesen, die sich an die Grundgedanken Herings anschließen, seien hier die von Pauli[1] und von Brunner[2] gemachten Vorschläge angeführt. Sie betreffen gleichfalls die Natur der der Empfindung zugrunde liegenden Vorgänge, besonders die Art der Gegensätzlichkeit. die zwischen den zu einem Paar vereinigten Vorgängen anzunehmen ist. Einer Ergänzung mit Rücksicht auf die Anomalien des Farbensinnes würden diese Theorien jedenfalls in ganz der gleichen Weise bedürfen, wie die ursprüngliche Theorie der Gegenfarben, einer Ergänzung, die sich gemäß dem oben Ausgeführten auf die peripheren Teile des Sehorgans zu beziehen haben würde. Was die Grundlagen der Empfindung selbst angeht, so stellen die Vorschläge Paulis und Brunners m. E. weit erheblichere Änderungen der Heringschen Theorie dar als die Autoren selbst annehmen, Änderungen, durch die die Theorie manchen Schwierigkeiten entgeht aber auch wieder in manche andere verwickelt wird. Da das Interesse der ganzen Vorstellungen, namentlich auch ihrer Abweichung von der ursprünglichen Theorie großenteils mit allgemein biologischen Fragen zusammenhängt, so muß eine genaue Erörterung hier unterbleiben und einer anderen Gelegenheit vorbehalten bleiben.

Einen Gedanken, der sich als gemeinsames Prinzip einer Anzahl anderer Versuche herausheben läßt, hat wohl Donders zuerst ausgesprochen. Er nahm an, daß die Empfindungen durchweg an Spaltungsprozesse geknüpft seien, die farblosen auf totalen, die farbigen Empfindungen aber auf partiellen Spaltungen (symmetrischen oder unsymmetrischen) hoch zusammengesetzter Moleküle beruhen. Diesem Gedanken steht die oben besprochene Theorie von Schenck sowie die sehr ähnliche von Mrs. Franklin nahe.

Dagegen hat Bernstein[3] auf ganz anderer Grundlage eine Theorie der optischen Empfindungen entwickelt, nämlich unter Heranziehung spezieller Vorstellungen über die Vorgänge im Zentralnervensystem, namentlich auch unter Annahme von Hemmungswirkungen.

M. E. zeigt gerade die Verschiedenartigkeit der Ergebnisse, zu denen alle diese Autoren gelangen, trotzdem sie von sehr ähnlichen Überlegungen ausgehen, welchen weiten Spielraum hier die Hypothesen haben. In meiner wiederholt ausgesprochenen Ansicht, daß es zurzeit verfrüht ist, diese Fragen in Angriff zu nehmen, haben mich die neuerlich gemachten Versuche (namentlich auch der von Schenck) nicht wankend gemacht. Doch verkenne ich nicht, daß es Sache individueller wissenschaftlicher Neigung und eines schwer diskutierbaren individuellen Geschmackes ist, wie weit man hier vorgehen mag.

Als Hauptergebnis der neueren Untersuchungen möchte ich hier aber nicht das fixieren, daß sie mit einer bestimmten Theorie des Sehorgans im Einklange sind oder ihr zur Stütze gereichen. Es besteht vielmehr in der Feststellung

[1] Pauli. Der kolloidale Zustand und die Vorgänge in der lebendigen Substanz. 1902
[2] Pflügers Archiv **121**, S. 370. 1908.
[3] Naturwissenschaftliche Rundschau **21**, S. 497. 1906.

der Tatsache, daß die verschiedenen, namentlich auch hinsichtlich ihrer allgemeinen Leistungsfähigkeit ungleich zu bewertenden Sehorgane, sich in ihrer Affizierbarkeit durch verschiedene Lichter, d. h. in der Beschaffenheit der ihnen gleich erscheinenden Lichter in sehr charakteristischer Weise unterscheiden. Die Ermittelung, welche Lichter einem jeden gleich aussehen, ist daher geeignet, ja soviel wir bis jetzt wissen, das einzige ganz zuverlässige Verfahren, um in relativ einfacher Weise über die Leistungsfähigkeit eines Auges in bezug auf Erkennung und Unterscheidung von Farben Aufschluß zu erhalten.

Die Untersuchungen von König und die lange Reihe der in methodischer Beziehung sich an ihn anschließenden Arbeiten haben gerade deshalb zu so wertvollen Ergebnissen geführt, weil sie ganz ohne theoretische Präsumtion eine gewisse Gruppe der Beobachtung direkt zugänglicher Tatsachen systematisch zu ermitteln suchten. Und sie sind auf diesem Wege zu Resultaten gelangt, die wir (wiederum ganz ohne theoretischen Ausblick) als allgemeine, der Beobachtung direkt entnommene Feststellungen über die Verhaltungsweise verschiedener Sehorgane betrachten dürfen. Dies zu betonen, besteht einiger Anlaß zunächst wegen der großen praktischen Bedeutung, die die Prüfungen des Farbensinns (beim Eisenbahn- und Marinepersonal) besitzen. Es wurde oben schon erwähnt, daß eben jene Verhältnisse die Grundlage der Untersuchungsmethoden bilden. Wir müssen aber diese Tatsache weiter auch deswegen hervorheben, weil die früher allerdings wohl ziemlich allgemeine Annahme, daß die optischen Gleichungen zur Charakterisierung der Sehorgane geeignet wären, längere Zeit in Zweifel gezogen und ganz zurückgedrängt worden war. In der Tat mußte Herings Lehre von der relativen Blau- bzw. Gelbsichtigkeit als einer Eigentümlichkeit, die in ganz gleicher Weise dem normalen, wie dem „rot-grün-blinden" Sehorgan zukommen könne, mit einer gewissen Notwendigkeit zu der Vorstellung führen, und hat sicher auch in größtem Umfang dazu geführt, daß wir es hier mit Eigentümlichkeiten von relativ untergeordneter Bedeutung zu tun haben, deren genauere Verfolgung wissenschaftlich kein großes Interesse bietet und jedenfalls ohne praktischen Wert ist[1]. Demgegenüber müssen wir betonen, daß diese ganze Lehre sich als tatsächlich unzutreffend herausgestellt hat, daß es innerhalb der farbentüchtigen Sehorgane Unterschiede ähnlicher Art, wie die zwischen Protanopen und Deuteranopen, nicht gibt, daß farben- tüchtige, farbenblinde und farbenschwache Sehorgane in durchaus regelmäßiger Weise sich durch die Art ihrer optischen Gleichungen kenntlich machen.

Die Einsicht, daß es sich so verhält, daß die optischen Gleichungen ein für die Charakterisierung der Sehorgane maßgebendes Kriterium darstellen, die hierauf gegründete Auseinanderhaltung der verschiedenen Formen des Sehorgans, des farbentüchtigen, der zwei Arten des dichromatischen (farbenblinden) und der zwei

[1] Dieser Vorstellung ist wohl durch die ablehnende Haltung Herings noch besonders Vorschub geleistet worden. In seiner den Gegenstand betr. Arbeit vom Jahre 1885 ließ er es dahingestellt, ob „der von manchen angenommenen strengeren Teilung der Rot-Grün-Blinden in Rot- und Grünblinde eine gewisse Berechtigung insofern zukommt, als die höheren Grade von Blausichtigkeit oder Gelbsichtigkeit häufiger vorkommen, als die Mittelgrade." Er hatte es also nicht für der Mühe wert gehalten, sich in bezug auf diese Frage eine bestimmte Überzeugung zu verschaffen. Später sind meines Wissens Beobachtungen solcher Art an dichromatischen oder farbenschwachen Sehorganen von Hering selbst oder auf seinen Anlaß nicht mehr ausgeführt worden.

Arten des farbenschwachen (anomalen) und die Möglichkeit die Sehweise eines jeden derselben, somit auch ihre Unterschiede in präziser Weise anzugeben: dies scheint mir der wichtigste Ertrag der neueren Untersuchungen zu sein. Als Grundlage für eine Theorie des Sehorgans in dem jetzt geläufigen Sinne reichen diese Tatsachen für sich allein nicht aus. Und in Ermangelung objektiver Beobachtungen über die Wirkung des Lichts, die morphologische oder chemische Gliederung des Sehorgans usw. wird jede derartige Theorie in gewisser Weise in der Luft schweben. Sicher aber wird eine künftige auf Ermittelungen dieser Art gestützte Theorie die Erklärung jener funktionellen Tatsachen sich in erster Linie zur Aufgabe stellen und somit in ihnen ihren wichtigsten Prüfstein finden müssen.

# Sachregister

## zu Band I—III.


Abbildung durch eine brechende Kugelfläche I 53, durch zentrierte Systeme von Kugelflächen I 58, allgemeine von Linien I 233.

Aberration oder Abweichung, chromatische I 46, im Auge I 146—160, sphärische oder monochromatische I 46, 160—172, direkte, transversale I 255, des im Auge gebrochenen Strahlenbündels I 357—374.

— (nach Meinong) III 115.

Aberrationswert I 254.

Abflachungswerte I 257.

Abklingen, farbiges, der Nachbilder II 208—218, nach momentanem Eindruck II 208—209, nach längerem Eindruck II 209—212, nach farbiger Beleuchtung II 212—215, nach wiederholtem Eindruck von Weiß II 216—219.

Absorption der dunklen Wärme im Auge II 57—59, der ultravioletten Strahlen II 60—61.

Absorptionsfarben, ihr Zustandekommen II 102, ihre Mischung II 102—105.

Abstand des Brennpunktes von der Netzhaut nach verschiedener Entfernung des Objektes I 111, der Kardinalpunkte des Auges von einander I 76, 127—129, der Kardinalpunkte der Kristallinse I 91.

Abweichung, chromatische, in Linsen I 46, chromatische, im Auge I, 146—160, sphärische der gebrochenen Strahlen I 46, 161, der scheinbar vertikalen Meridiane III 143—145, 337—341, deren Grund III 349—350, der Gesichtslinie von der Augenachse I 78, 95, der Sehweiten für horizontale und vertikale Linien I 163—167, laterale eines Strahles I 252, 254.

Achromatische Linsen I 46.

— Systeme I 46.

Achromatopsie II 122, s. Farbenblindheit.

Achsenametropie I 313.

Adaptation des Auges I 103, s. Akkommodation.

Adaptation II 264—290, Messung und Berechnung II 266—269, Dunkeladaptation II 268—274, Helladaptation II 274—278, verschiedener Netzhautteile II 274—282, der Fovea centralis II 282—283, Beziehungen zum Sehpurpur II 327—328.

Adaptationsbreite II 269.

Adaptometer II 267.

Aderhaut I 13—15, s. Chorioidea.

Äquatorealebene I 235.

Akkommodation I 103—141, ihre Erscheinungen I 103—114, ihr Mechanismus I 120—141, 143—146, 327—353, beobachtet im Augenspiegel I 220, ihre Breite I 114—118, Abhängigkeit von der Konvergenz III 50, A. für die Ferne ist der Ruhezustand des Auges I 115, A. an ausgeschnittenen Augen I 124—125, Theorien ihres Mechanismus I 126—128, 134—141, 143—146, 350—353, A. als Mittel zur Beurteilung der Entfernung III 245—247, 308.

Akkommodationsbreite I 117, 322.

Akkommodationsgefühl III 236.

Akkommodationslinien I 103, III 235.

Akkommodationsphosphen I 342, II 10.

Akkommodationstheorien I 135—141, 350—353.

Alleekurven III 324.

Alterationsformen (des normalen Farbensystems) II 354.

Ametropische Augen I 115, 308.

Anaglyptoskop III 240.

Analogieschlüsse III 6, 23—29.

Anastigmatische Strahlenbündel I 230.

Anomaloskop II 354.

Anordnung, flächenhafte, der gesehenen Objekte III 132—133, 435.

Anorthoskop II 187—190, III 210.

Anschauung, Definition III 11, Zusammenhang mit den Augenbewegungen III 361, s. Wahrnehmung.

Antagonismus im Akkommodationsmechanismus I 347.

Antirrheoskop III 223.

Aplanatische, brechende Flächen I 46, 161. — Systeme I 46.
Apriorität der Raumvorstellung III 520.
Arteriae ciliares I 15, centralis retinae I 24, s. Netzhautgefäße.
Astigmatische Strahlenbündel I 230.
Astigmatismus I 163—167, 168—171, 172—173, der Aberration I 257, der normalen Hornhaut I 273, als Refraktionsanomalie I 325.
Astrometer II 164.
Asymmetrie des brechenden Apparats im Auge I 95, des scheinbar vertikalen Meridians III 143—145, pathologische des Auges I 354—357, s. Astigmatismus.
Asymmetrienwerte I 250, des im Auge gebrochenen Strahlenbündels I 354.
Atrope Linie III 59, 67.
Atropin, Wirkung auf die inneren Augenmuskeln I 115.
Aubertsches Phänomen III 234.
Auflösungsvermögen des Auges I 375.
Aufmerksamkeit, Einfluß auf die Wahrnehmungen III 7, Mittel sie zu fesseln III 34, 454—455.
Aufnahmepunkt III 539.
Auge der wirbellosen Tiere I 2—3, der Wirbeltiere I 3—4.
Augenachse I 75, Veränderung ihrer Länge bei Akkommodation I 123, 134, 144.
Augenhöhle I 32
Augenkammer, hintere I 20, 21, 30, vordere I 30.
Augenleuchten I 194—197, 221—222, II 19.
Augenlider I 34.
Augenmaß III 135—169, 195—203, für lineare parallele Längen III 140—144, für Linienkrümmung III 143, für Parallelismus III 144, für Winkel III 144, 196, für nicht parallele Längen III 145—146, Theorie für das Blickfeld III 146—147, 435—436, A. im indirekten Sehen III 149—157, Täuschungen III 157—168, 196—199, Theorien III 200—202, 492—494, s. auch Tiefenwahrnehmung.
Augenmuskeln, äußere I 33, hypothetische Wirkung bei der Akkommodation I 123, 133, 143—144, Wirkung bei den Augenbewegungen III 46—47, Ansatzpunkte und Drehungsachsen III 99, 125.
Augenspiegel I 196, 210—220, 223—224, binokularer III 295, Theorie I 203—211.
Austrittspupille I 109.
Autokinetische Empfindungen III 229.
Autophthalmoskop I 224.

Basallinie III 37.
Basis (bei binokularen Instrumenten) III 541.
Becquerel-Strahlen II 23.
Beleuchtung, allgemeines Gesetz I 200, des Augengrundes I 195, 210—214, momentane III 163, 373—374, 419—420 farbige II 229—233, 242—247, Mittel ihre Farbe zu erkennen II 234—235; intermittierende erscheint kontinuierlich II 174—178, zur Beobachtung bewegter Körper angewendet II 178—179, farbiges Abklingen derselben II 193, 216—218.
Belladonna, ihre Wirkung auf Iris und Ciliarmuskel I 115.
Benhamsche Scheibe II 374.
Bewegungen des Auges III 34—104, 454—457, translatorische III 105, ihre Geschwindigkeit III 127, Registrierung III 129, beider Augen von einander abhängig III 46—54, 435, des Bluts entoptisch sichtbar II 218, 260—261, I 191—192, des Kopfes gibt Tiefenwahrnehmung III 247—249, scheinbare bei Schwindel III 207—210, 223, intermittierender Bilder II 184, subjektiver Erscheinungen II 12, Wahrnehmung von B. III 119, 226.
Bewegungsgesetz des Auges s. Drehungsgesetz.
Bewegungsnachbilder III 231.
Bilder, optische I 44, III 219, entworfen durch eine Kugelfläche I 53—55, ihre Größe steht in Beziehung zur Konvergenz der Strahlen I 58, auf der Netzhaut I 73—74, 101—103, 219—220, gespiegelte der Kristallinse I 121, von Prismen entworfen II 64, 79—87.
Bindehaut I 34.
Binokulare optische Instrumente III 290—299, 534—564.
— Reizsummation II 286.
Binokulares Sehen III 249—431, 436—454, 464—467, empiristische Theorien desselben III 436—442, 453—454, Theorie von Panum III 441—444, von Hering III 444—453.
Binokulare Wahrnehmung der Entfernung III 248—260, Genauigkeit III 254—256, 311, Augenmaß III 315—322.
Bioskop III 297.
Blaublindheit II 340.
Bleichungswerte reiner Lichter II 327.
Blendung oder Iris I 13.
Blickebene III 37, ihre Primärlage III 136.
Blickfeld III 37, 136.
Blicklinie III 37.
Blickpunkte III 37, 136, sind Deckpunkte III 332.
Blinde, ihre Wahrnehmungen nach der Operation III 182—190, 485.
— Fleck II 24—27, 38, Messung seiner Größe II 26—27, seine Ausfüllung III 169—179.
Blutlauf, subjektiv sichtbar I 191—192, II 218, 260—261.

Brachymetropische Augen I 115.
Braun, als Farbe II 109.
Brechkraft I 239, 242.
Brechung des Lichts I 43, ihr Gesetz ausgedrückt durch die optische Länge II 65—66, Br. an einer Kugelfläche I 49—57, in zentrierten Systemen von Kugelflächen I 58—69, in Linsen I 69—72, im Auge I 73—99, 259—306, in der Hornhaut I 75, 78—80, 285, in der Kristallinse I 80—85, 88—93, 298, in Prismen II 52, 76—80, in einem Ellipsoid I 165.
Brechungsindex, Brechungsverhältnis oder Brechungsvermögen, Definition I 43.
Brechungsverhältnisse der Augenmedien I 84—88, 279, 294, totales der Kristallinse I 90, verschiedenfarbiger Strahlen II 57.
Brechungsvermögen I 43.
Brechungswinkel I 43.
Breitenwinkel III 344.
Brennebene I 48, 55.
Brennlinien I 51, auf der Iris sichtbar I 126, nicht homozentrischer Strahlen I 166, II 75.
Brennpunkte I 46, 47, 55, 64, des Auges I 75—76, für vertikale und horizontale Linien verschieden I 163, 168, ihre analytischen Bedingungen II 75, wechselnde Entfernung von der Netzhaut I 111.
Brennpunktsgleichungen I 243.
Brennweiten I 47, verhalten sich wie die Brechungsverhältnisse des ersten und letzten Mediums I 63—64, der Linsen I 71, des Auges I 76. Änderungen bei der Akkommodation I 127.
Brillen I 108, 118—119, ihre stereoskopische Wirkung III 283.

Camera obscura I 45, kann stereoskopisch wirken III 297.
Canal godronné oder Petiti I 32.
Cardinalpunkte s. Kardinalpunkte.
Chiasma nervorum opticorum I 32, III 393—394, 437—439, 500.
Chorioidea I 13—14, ihre Gefäße im Augenspiegel sichtbar I 219—220, nicht ganz undurchscheinend I 183.
Chromatische Abweichung der Glaslinsen I 46, des Auges I 146—160.
— Differenzen I 234.
— Fokusdifferenz I 159.
— Neigungsdifferenz der Visierlinie I 160.
— Vergrößerungsdifferenz I 159.
Ciliarfortsätze I 14, 21.
Ciliarmuskel I 14, 21, Wirkung bei Akkommodation II 126, 144—145, 342.
Circuli arteriosi Iridis I 15.
Conjunctiva I 34.
Cornea s. Hornhaut.
Cyanblau II 55, seine Absorption im gelben Fleck II 254—259, 139.

Dädaleum II 185.
Dämmerungssehen II 191, Qualität der Empfindung II 293, Fixation beim D. II 281, fehlt in der Fovea centralis II 292, Tiefenwahrnehmung im D. III 329, räumliche und zeitliche Unterscheidungsfähigkeit im D. II 311.
Dämmerungswerte reiner Lichter II 297, ihre Abhängigkeit von der Adaptation II 327.
Daltonismus II 122.
Dauer der Lichtempfindung II 172, 179—181, s. auch Verschmelzungsfrequenz.
Deckpunkte III 332, s. korrespondierende Punkte.
Demours Membran I 5.
Descemetsche Membran I 5.
Deuteranomale II 344.
Deuteranopen II 340.
Dezentration der Linse bei der Akkommodation I 339, des Auges I 304, pathologische I 357.
Diagonalastigmatismus der Aberration I 257.
Dichromatische Farbensysteme II 122—128, 140—143, ihre Sehweise durch Eichung geprüft II 337—338, Reduktionsformen des anomalen Farbensystems II 339, ihre beiden Formen nicht physikalisch verschieden II 337, ihre Beziehungen zur Farbenblindheit der normalen Peripherie II 352, zu den anomalen Trichromaten II 356, praktische Bedeutung II 353, Prüfung II 353.
Diffraktion des Lichtes I 38, in der Pupille I 167—169, des Lichtes in der Pupille I 167, 319, 375.
Dilatator Pupillae I 15, 21.
Dioptrie I 246.
Diplopie s. Doppelbilder.
Direktes Sehen I 74.
Direktionskreise III 67, erscheinen gerade III 146—152.
Disparate Punkte III 332.
Dispersion des Lichts I 39—40, im Auge I 146, 151—152.
Divergenz der Augen III 50, Einfluß auf die Tiefenwahrnehmung III 264.
Donders' Gesetz der Augenbewegungen III 39, theoretische Begründung III 54, 515.
Doppelbilder, monokulare I 163, III 220, binokulare III 330—377, gleichnamige und ungleichnamige III 331—332, ihre scheinbare Entfernung III 328, 353—354, 448—453, ihre Verschmelzung III 359—368, Einfluß der Augenbewegungen darauf III 371—374, Richtung, in der sie projiziert werden III 376—377, Verhältnisse bei Schielenden III 334, 473, 479—483.

Doppelt asymmetrische Systeme I 235.
Doppeltsehen s. Doppelbilder.
Drehpunkt des Auges III 35, 89—90, 106—113.
Drehpunktswinkel I 312.
Drehschwindel III 208, 233.
Drehungen des Auges, geometrisch III 60—72, stereographisch dargestellt III 88—90, 455.
Drehungsachsen für die Augenmuskeln III 46—47, 99—101, 125—126, Lage ihrer Ebene nach Listings Gesetz III 43—45, 64—66.
Drehungsgesetz des Auges III 39, 103, seine theoretische Begründung III 54—61, 72—83, 511—520, seine Prüfung mittels der Nachbilder III 91—94, mittels des blinden Flecks III 95, durch binokulares Sehen III 97—99.
Drehungszentrum des Augapfels III 35, 89—90, 106—113.
Druck im Auge I 6, Einfluß auf den Blutlauf II 9, subjektive Erscheinungen II 9 III 4, 218—221.
Druckbilder II 8.
Dunkeladaptation II 268—274.
Duplizitätstheorie II 290—292, Beziehung zur Young-Helmholtzschen Farbentheorie II 357.

Eichung des Spektrums II 337—340.
Eichwerte, Eichwertkurven II 340.
Eigenlicht der Netzhaut II 12, 148, 194, 201.
Eigenschaften der Objekte bestehen in ihren Wirkungen auf andere III 20—21.
Einfach asymmetrische Systeme I 234, 250.
Einfache Lichter II 52.
Einfallsebene I 43.
Einfallslot I 43.
Einfallswinkel I 43.
Eintrittspupille I 108.
Elektrische Erscheinungen am Auge und Sehnerven II 48.
— momentane Beleuchtung III 163, 373—374, 419—420, 437—438.
— Reizung des Sehnervenapparats II 13—17, 19—20, 140.
Emmetropie I 115, 308.
Emmetropische Augen I 115.
Empfindungen, subjektive schwer zu beobachten III 7—9, zusammengesetzte zu analysieren III 9—11, nicht durch Vorstellung zu beseitigen III 3, 451, unmittelbar auf das Objekt bezogen III 25, 29, 139, ihre Bedeutung als Symbole äußerer Qualitäten II 56, III 17, 432, Empfindung und Urteil 486—488.
Empfindungskreise III 158, korrespondierende III 374, 442—444.
Empiristische Theorie der Wahrnehmungen III 11, 16—135, 154, 211, 432—440, 453—454, 497—511, 525—534.
Energiemengen, kleinste zur Erregung genügende II 289.
Entfernung der Objekte, beurteilt nach scheinbarer Größe III 236, nach der Deckung der Objekte III 237, nach der Luftperspektive III 242, nach der Akkommodation III 245—246, 308, mittels Bewegung III 247—249, binokular III 249, nach der Konvergenz III 260—265, 312, bei Schielenden III 483, beim Dämmerungssehen III 329.
Entoptische Erscheinungen I 175—194, III 220.
— Parallaxe I 177, 187.
Episkotister III 425.
Erfahrung, Einfluß auf die Wahrnehmungen III 10—16, auf das Prinzip des Experimentierens gegründet III 26—29, s. Empiristische Theorie.
Erhebungswinkel des Blicks III 37, 71.
Ermüdung der Netzhaut durch Licht II 192, 200, für Konvergenz III 266, 436, durch Akkommodationsanstrengung I 119, s. Umstimmung.
Erregung der Netzhaut durch Licht II 5—6, 24—39, mechanische II 6—11, durch innere Ursachen II 11—13, elektrische II 13—17, 19—20.
Erweiterer der Pupille I 15, 21.

Farben, einfache II 52, Festsetzung ihrer Namen II 54, 63, erscheinen veränderlich nach der Lichtintensität II 61, 153, ihre Übergänge II 62, verglichen mit den Tönen der Skala II 63, 97—99, gemischte II 101—117, 138—140, zwei in demselben Felde übereinander gelagert II 102, 243, III 416, ihr Aussehen an der Grenze des Gesichtsfeldes II 129, 140, induzierte, induzierende reagierende, resultierende F. II 225, primäre und reagierende II 195, der Nachbilder II 203—219, 369, 371.
Farbenblindheit (angeborne partielle), s. dichromatische Farbensysteme; der normalen Peripherie II 129, 140, 347; totale angeborne II 316, Reizwerte der reinen Lichter II 317—318, zentrales Skotom II 320, räumliche und zeitliche Unterscheidungsfähigkeit II 320—321, Erklärung als Isolierung des Dämmerungssehens II 316, Mangel fester Fixation II 321.
Farbenkreis s. Farbentafel.
Farbenkreisel s. Farbenscheiben.
Farbenlehre s. Farbentheorie
Farbenmesser (E. Rose) II 142.
Farbenmischapparat Helmholtzscher II 334, andere II 336.

Farbenmischung, monokulare II 101—117, binokulare III 410—417, 424, 430, bei Schielenden III 483.
Farbenpyramide II 111.
Farbenscheiben II 103, 116—117, 176—185, 193.
Farbentafel, das System der Farben darstellend II 111—119, 139, 352—353.
Farbentheorie von Brewster II 93, 97, 119, von Goethe II 95—96, von Grailich II 129—130, von Th. Young II 120—122, 141—142, 154, 204, 206, 213, 222, 358, III 415—417, Aubert 361, Hering 361—364, Müller 364, Schenck 365, Franklin 365, Pauli II 376, Brunner II 376, Bernstein II 376.
Farbenton II 109.
Farbenunterscheidung auf kleinen Feldern II 128.
Farbenwechsel im Nachbilde II 196—197, 204, 208—218.
Farbenzerstreuung I 39, im Auge I 146, 151, II 61, im Prisma II 52—55, 86—89.
Farbige Ringe, welche um Lichtquellen gesehen werden I 193.
— Schatten II 230.
Farbstoffe II 163.
Fechnersches Gesetz II 147.
Fehler des Augenmaßes s. Augenmaß; der Brechung im Auge s. Abweichung.
Fernpunkt I 108, 115.
Fernrohre (binokulare) III 292, 562.
Fernrohrvergrößerung III 539.
Fixation, Gesetz der binokularen III 513.
Fixationspunkt III 37, 136 s. auch Fovea centralis und Gelber Fleck.
Fixieren I 74, III 37, 49—51, bewegter Objekte III 207—210, Ungenauigkeit desselben III 342, 365—367, im Dämmerungssehen II 281, der total Farbenblinden II 321.
Flächenhafte Anordnung der gesehenen Objekte III 132.
Flatternde Herzen II 218—219, 371.
Fleck, blinder s. Blinder Fleck, gelber s. Gelber Fleck.
Flimmergrenze s. Verschmelzungsfrequenz.
Flimmern II 179, 216, 314.
Flimmerphotometrie II 349.
Flimmerskotom II 262.
Flimmerwerte reiner Lichter II 350, bei Dichromaten und anomalen Trichromaten II 351.
Fluchtlinie III 280.
Fluchtpunkt III 281.
Fluoreszenz I 40, II 55—56, der Hornhaut und Linse II 60, Beobachtung derselben II 93—94, der Netzhaut II 48.
Fokalebene I 231.
Fokallinie I 230.
Fokalpunkt I 230.
Fokalpunktwinkel I 309.
Foramen opticum I 32.
Fovea centralis I 24, im Augenspiegel sichtbar I 220, entoptisch sichtbar I 184, II 254—256, Abmessungen II 254, ihre Nachtblindheit II 280, Fehlen des Purkinjeschen Phänomens in derselben II 305.
Fraunhofersche Linien II 57, ihre Wellenlängen II 63.
Frontalschnitt III 36.
Frontalwert III 537.
Fusionsbewegungen III 50—51, 118—119, 515.
Fußboden als Horopterfläche III 349, 355—358.

Ganzbild III 332.
Gegenfarben (Theorie der G., Hering) II 361—364.
Gelb II 54.
Gelber Fleck der Netzhaut I 23, 26, entoptisch sichtbar I 183—184, subjektiv sichtbar II 254—256, im Augenspiegel sichtbar I 220, bei elektrischer Durchströmung sichtbar II 17, Stelle des genauesten Sehens II 28—31, korrespondieren beiderseitig III 332—337, Verschmelzung von Doppelbildern auf ihnen III 365.
Genauigkeit des Sehens kleiner Objekte II 29—31, deren peripherische Abnahme II 35, 37, im Tages- und im Dämmerungssehen II 311, des Augenmaßes III 140—144, s. Augenmaß; der Tiefenwahrnehmungen III 256, 311, 353—356, der Trennung von Doppelbildern III 367—369.
Gesetz, Donderssches, Fechnersches usw. s. bei den betr. Namen.
Gesichtsachse I 78, III 37.
Gesichtsfeld I 74, III 132, Unterscheidung vom Sehfeld III 135—137.
Gesichtslinie I 78, III 37.
Gesichtspunkt in der Perspektive III 270, 279.
Gesichtstäuschungen, ihr Prinzip III 4, ihre Klassen 217—222, Theorien III 200—202, 492—494.
Gesichtswahrnehmungen, Definition III 3, 496.
Gesichtswinkel I 110.
Gestirne (Täuschung in bezug auf ihre Größe) III 242, 307, 492.
Ghost s. Purkinjesches Nachbild.
Glanz III 417—420, 438.
Glashaut I 31—32.
Glaskörper I 30, die entoptisch gesehenen Körperchen darin I 179.
Goldgelb II 54.
Grau, als Farbe II 109—110.
Gravesandsche Schneiden II 90, 92.

Größe (absolute), Beurteilung derselben III 492.
Grün II 54, aus Blau und Gelb nicht mischbar II 102, 105, 108, 135.
Grünblindheit II 127, 340, s. auch dichromatische Farbensysteme.
Grundfarben, drei II 118—123, 134—136, 138—140, von Brewster II 93—96, 119, vier von Leonardo da Vinci II 135, von Aubert und Hering II 361.
Grundgesetze der allgemeinen optischen Abbildung I 233.
Grundlinie III 37.
Quajakharz als lichtempfindliche Substanz II 60.

Haarstrahlenkranz I 162.
Haidingers Polarisationsbüschel II 256—259.
Halbbild III 332, s. Doppelbilder.
Hauptblickpunkt III 68, 136.
Hauptbrennweiten I 47, 61.
Hauptebenen I 55, 61, in der Reliefperspektive III 270, 282.
Hauptmeridianebenen III 379.
Hauptpunkte I 47, 55, 61, 64, des Auges I 75.
Hauptpunktwinkel I 309.
Hauptpunktsgleichungen I 242.
Hauptschnitt I 230.
Hauptstrahl I 229.
Hauptvisierlinie III 137.
Helladaptation II 274.
Helligkeit der optischen Bilder I 200—205, der Augenspiegelbilder I 205—206, der prismatischen Bilder II 87, der Farben II 109, subjektive und objektive II 144—151, intermittierenden Lichts II 174—177, 192—193, subjektive mit der Zeit abnehmend II 202.
Helmholtzsche (Youngsche) Theorie der Gesichtsempfindungen s. Farbentheorie.
Hemeralopie II 269, 322.
Herzen, flatternde II 218—219, 371.
Hesssche Kernbildchen I 290.
Höhenwinkel III 344.
Homöomorphe Raumbilder III 536.
Homozentrisches Licht I 44, bei prismatischer Brechung II 79—83.
Horizont (Größererscheinen der Gestirne am H.) III 242, 307, 492.
Horizontalhoropter III 350.
Horizontalschnitte, anatomische III 36.
Hornhaut I 5, Krümmung derselben I 8, 100—101, 259—285, unverändert bei der Akkommodation I 123, 128, 137, Berechnungsmethoden I 276, Dicke, Brechungsindex I 279, entoptisch gesehen I 178, fluoreszierend II 60. 94.
Horopter III 347—352, 394, Konstruktion desselben III 351—353, geometrisch bestimmt III 381—392, Bedeutung für die Tiefenwahrnehmung III 269, 313.
Horopterabweichung (Hering-Hillebrandsche) III 399.
Horopterkurve III 348, 386.
Horopterkreis J. Müllers III 349—352.
Humor aqueus I 30.
Hyaloidea I 30.
Hypermetropie I 115, 308, 323.
Hyperplastische Erscheinung (bei binokularen Instrumenten) III 545.
Hypoplastische Erscheinung (bei binokularen Instrumenten) III 545.

Identische Punkte der Netzhäute III 332—347, 437, verschieden in das Gesichtsfeld projiziert III 368—372, geometrische Bestimmung ihrer Lage III 377—383, Theorie ihres Ursprungs III 394, 437—439, 500—501, bei Schielenden III 479—483.
Identitätstheorie III 16.
Indigblau als Farbe II 55.
Indirektes Sehen I 74, seine Genauigkeit II 35—38, für Farben II 129, 140, 347, bei Dichromaten und anomalen Trichromaten II 351.
Individuelle Unterschiede der optischen Gleichungen II 341, bei Dichromaten II 341.
Indizialgleichung der Linsensubstanz I 292.
Indizialkurve I 292.
Induzierende Farbe II 225.
Induzierte Farbe II 225.
Innervationsgefühl der Augenmuskeln III 204—209, 433, 494.
Intensität der Lichtempfindung II 144—151, verschiedenes Gesetz für verschiedene Farben II 152.
Interferenzspektrum, Abweichung vom prismatischen II 58, Mittel zur Prüfung von Farbenblinden II 142.
Intermittierende Beleuchtung, scheinbar kontinuierlich II 173—178, zur Beobachtung bewegter Körper II 178—180, gibt Farbenerscheinungen II 193, 216—218.
Intervall, farbloses II 308.
Intrakapsulärer Akkommodationsmechanismus I 333.
Iris I 13, ihre Ansatzweise I 132, ihre Entfernung von der Hornhaut I 17, der Linse anliegend I 16, 20—21, bei der Akkommodation I 120—121, 129, 144—145, entoptisch sichtbar I 177.
Irradiation II 33—34, 155—161, 168, vom Dunklen über Helles II 158—161, Theorie von Plateau II 160—161, 168, Bedeutung für geometrisch optische Täuschungen III 200.

Isoindizialflächen der Linsensubstanz I 292.
Isoskop III 125.

Kardinalpunkte optischer Systeme I 46, 47, 54—56, 61, 64, ihr Gebrauch I 49, des Auges I 75, 92—96, 300—303, des akkommodierten Auges I 127, 144, 335.
Kausalgesetz, sein Ursprung und seine Bedeutung III 30—31.
Kaustische Linie I 51.
— Flächen I 230.
Kernfläche des Sehraums (Hering) III 446, Bedingungen der Lokalisation in derselben III 314.
Kernlinse I 292, Brechkraft derselben I 295, äquivalente I 298.
Kleinste wahrnehmbare Objekte II 30.
Knotenebenen I 63.
Knotenpunkte I 47, 56, 63, des Auges I 75, Veränderung bei der Akkommodation I 128, 144.
Koeffizientensatz II 366.
Kombination des Auges mit optischen Instrumenten I 308.
Komplementärfarben II 105—107, in den Nachbildern II 203—209, durch Kontrast II 224 ff., 228—236, 239—249, III 415 ff.
Konfluxion III 201.
Konfundierung III 473.
Kongruenzebene in der Reliefperspektive III 270—271, 281—282.
Konjugierte Vereinigungspunkte der Strahlen I 45, 52.
Kontrast II 224—252, simultaner II 225, 228—251, sukzessiver II 225—228, scheinbare Umkehrung II 236—237, K. auf großem farbigem Felde II 237, auf kleinem Felde II 239—242, Theorie desselben II 249—252, III 159, 200, für Linienrichtungen III 167, binokularer III 419—423.
Kontrolle der Augenstellungen durch die Bilder III 205—207, 436, 514—517.
Konvergenz, Einfluß auf Akkommodation I 117, Einfluß auf Raddrehung der Augen III 45, Einfluß auf Beurteilung der Richtung III 211—219, Mittel zur Beurteilung der Entfernung III 260—269, 312—313, 436, 545.
Kopfbewegungen III 61, 120.
Korrektionswert I 307.
Korrespondenz, punktuelle I 232, der Netzhäute; ihre Änderung bei Schielenden III 334, 474.
Korrespondierende Empfindungskreise III 374, 441—444.
— Punkte beider Netzhäute III 332—347, 437, verschieden in das Gesichtsfeld projiziert III 368—372, geometrische Bestimmung ihrer Lage III 377—383, Theorie ihres Ursprungs III 394, 437, 438, 500—501, bei Schielenden III 479—483.
Kreuzspinngewebefigur II 262.
Kreuzungspunkt der Richtungslinien I 77, 98, der Visierlinien I 97, 104.
Kreuzungswinkel korrespondierender Meridiane III 339—347.
Kristallinse I 28—30, Brechung des Lichts in derselben I 79—84, Messung der Dicke I 91, Veränderungen bei der Akkommodation I 121, 127—132, 143—145, entoptisch gesehen I 164, 177—178, Ort ihrer Flächen I 286, Krümmung derselben I 288, Brechungsindizes I 294, optisches System derselben I 299, fluoreszierend II 60, 94—95.
Krümmungsametropie I 313.
Krümmungsasymmetrie I 252.
Künstliches Auge I 113.
Kundtsche Täuschung II 169, 313.
Kurve dritten Grades III 347, 384.
Kurzsichtigkeit I 108, 115.

Längshoropter (seine Bedeutung für die Tiefenlokalisation) III 313—315.
Lampertometer II 163.
Landschaft, ihre Farben III 9—10, 358, Regeln photographischer Aufnahmen für Stereoskope III 554.
Lateral III 37.
Latitudo der Blickrichtung III 38, 71.
Lavendelgrau II 61.
Leitstrahl I 229.
Leitungsfähigkeit der Nerven II 4.
Licht, allgemeine Eigenschaften desselben I 35—40, einfaches II 52, intermittierendes II 173—181, primäres und reagierendes II 195.
Lichtfleck des Auges I 192.
Lichtchaos des dunklen Gesichtsfeldes II 12, 194.
Lichtempfindliche Elemente der Netzhaut I 12.
Lichtempfindung als spezifische Energie des Sehnerven II 4—6, ihre Erregungsweisen II 5—17, 19—20, Ort ihrer Entstehung II 11—33, ihre Qualitäten II 52—64, 101—129, 138—143, ihre Intensität II 144—155, ihre Dauer II 172—190, 192—193, ihre allmähliche Abnahme bei konstanter Beleuchtung II 202—203, ihre Nachdauer II 194—221, ihre objektive Deutung III 3—31.
Lichter (reine) II 52, ihr Aussehen II 54, Peripherie-, Flimmerwerte und Minimalfeldhelligkeiten II 348—352, Dämmerungswerte II 296—300, Reizwerte für den total Farbenblinden II 317—318, Bleichungswerte II 327 s. auch Farbenmischung.
Lichtmischung, Lichtmischapparate, s. Farbenmischung, Farbenmischapparate.

Lichtschattenfigur II 217.
Lichtstaub des dunklen Gesichtsfeldes II 12, 194.
Lichtstrahlen, ihre Selbständigkeit I 38, normal zur Wellenfläche II 68.
Lichtstreifen von den Lidern herrührend I 177, wandelnde im dunklen Felde II 12.
Ligamentum Iridis pectinatum I 14, suspensorium lentis I 31.
Linienhoropter III 350.
Linsen I 69, ihre Gestalt und Kardinalpunkte I 69—70, s. außerdem Kristalllinse.
Linsenstereoskop (Brewstewrsches) III 252, abgeändertes (nach Helmholtz) III 290.
Listings Gesetz der Augenbewegungen III 43, seine theoretische Begründung III 55—61, 72—84, 454, 515, geometrische Darstellung III 64—72, stereographische Darstellung III 89—90, 455, Einfluß auf das Augenmaß III 145—158, auf die Form des Horopters III 351—358, 386—393.
Loewesche Ringe II 255.
Lokalisation (Verhältnis zur Raumvorstellung) III 462, Eigentümlichkeiten der normalen L. III 464—472.
Lokalisierung der subjektiven Erscheinungen III 217—223.
Lokalzeichen III 130, 433, 436, 503.
Longitudo der Blickrichtung III 38, 71.
Luftperspektive III 242.

Macula lutea retinae I 22.
Makropsie III 323.
Mechanische Reizung der Netzhaut II 7.
Medial III 37.
Medianebene III 36.
Medianlinie der Blickebene III 37.
Meibomsche Drüsen I 34.
Membrana limitans I 23, hyaloidea I 30.
Meridiane des Blickfeldes III 136, des Sehfeldes III 137, scheinbar vertikale III 144, 157—158, 338—340, korrespondierende beider Augen III 335—340, 343—344, 379—381.
Meridionalebene I 235.
Mikropsie III 323.
Mikroskop, binokulares III 293—295, 550, nach Greenough III 551.
Minimalfeldhelligkeiten II 349.
Minimum der Ablenkung II 83.
Mischung der Farben II 101—117, der Spektralfarben II 102, 131—133, 138—140, 333—336, auf dem Farbenkreisel II 103, 117, 176—177, 140, durch eine Glasplatte II 103, 133—135, andere Methoden II 135, Unterschied von der Pigmentmischung II 102—105, 135—136.
Mitempfindung II 12, 160.
Mond am Horizont III 242—244, 307.
Monochromatische Abweichungen I 172—174.
Monokulares Gesichtsfeld III 129—193.
Morgagnische Flüssigkeit I 29, 138.
Mücken, fliegende (Mouches volantes) I 179.
Müllersche Fasern I 23, Kreis III 349, 352.
Musculus crystallinus I 124, 139, ciliaris s. tensor Chorioideae I 14, 21, dessen Wirkung bei der Akkommodation I 126, 144—145, M. Sphincter et Dilatator Pupillae I 15, 21, 125, M. recti et obliqui s. Augenmuskeln.
Muskelgefühl III 204, 433, 494, kontrolliert durch Gesichtsbilder III 205—206.
Myopie I 108, 115, 308, 324.

Nachbilder II 172—222, positive II 173, 195—197, Purkinjesches II 370, negative II 173, 195, 198—202, ihr Farbenwechsel II 196, 207—210, ihre Dauer II 198, farbige II 203—208, Theorien darüber II 219—222, 368, geben stereoskopische Tiefenwahrnehmung III 373—374, verursachen den sukzessiven Kontrast II 225—228, im binokularen Kontrast III 420—422, s. auch zeitliche Verhältnisse der Lichtwirkung und Umstimmung.
Nachlaufendes Bild s. Purkinjesches Nachbild.
Nachtblindheit II 269, 322.
Nachtvögel II 330.
Nachwirkung des Lichteindrucks II 172, s. auch zeitliche Verhältnisse der Lichtwirkung.
Nähepunkt I 108.
Nativistische Theorie der Gesichtswahrnehmungen III 11, 16, 17, 134, 211, 440—454, 505.
Naturgesetze sind Gattungsbegriffe III 31.
Nebelstreifen, wandelnde, Goethe's II 12.
Nerven, motorische und sensible II 3.
Nervenenden in der Netzhaut I 26—27, II 24, 27—28, s. auch Stäbchen und Zapfen,
Nervenpapillen II 39.
Nervenzellen in der Netzhaut I 23, 27.
Netzhaut, ihr Bau I 22, 25—27, ihre mechanische Reizung II 7—11, innere Reizung und Eigenlicht II 11—12, elektrische Reizung II 13—17, 19—20, Reizung durch Licht II 6—24, nur in den hinteren Schichten empfindlich II 28, ideelle III 138, Veränderungen durch Licht II 41—48, Bleichung des Sehpurpurs II 44, Elektrische Erscheinungen II 48, Wanderung des Pigments II 42, Kontraktion der Zapfen II 42.
Netzhautbild I 73, III 138, äußerlich sichtbar I 73, im Augenspiegel sichtbar I 220.
Netzhautgefäße, entoptisch sichtbar I 182—187, im Augenspiegel I 219, durch Druck sichtbar II 8—9, ihr Verschwinden II 238.

Netzhautgrube I 24, als Fixationspunkt I 73, 220, im Augenspiegel sichtbar I 220, entoptisch I 184—186, II 254—256, Abmessungen II 254, bei elektrischer Reizung II 17, 20, hemeralopisch II 280, ermangelt des Purkinjeschen Phänomens II 305.
Netzhauthorizont III 38, 137, korrespondierend in beiden Augen III 335.
Normaler Gebrauch des Auges III 4, 13—15, 129, 434—435.
Normalfläche Recklinghausens III 274, 285—286.
Normalsichtige Augen I 115.
Nystagmus der total Farbenblinden II 321.

Okzipitalpunkt des Sehfeldes III 91, 136, 146.
Ophthalmometer, Beschreibung I 9—10, zur Messung der Hornhautkrümmung I 11—12, vordere Fläche I 259—270, hintere Fläche I 282—285, zur Messung des Abstandes der Pupille I 18—19, zur Messung der Brennweiten toter Linsen I 88—91, der Linsenkrümmung im gesunden Auge I 129—131, 144—145, der Brechungsindizes flüssiger Substanzen I 87.
Ophthalmometrischer Achsenpunkt I 270.
Ophthalmoskop Cramers I 139, s. Augenspiegel.
Ophthalmotrop III 47, 101—102, 126.
Optische Achse des Auges I 270, 304.
Optische Länge eines Strahls II 65 ff.
Optisches Zentrum einer Linse I 68, der Pupille I 366.
Optische Zone der Hornhaut I 272, der Pupille I 364.
Optogramme II 45.
Optometer I 111.
Ora serrata Retinae I 22.
Orange II 54.
Orbita I 32.
Ordnung der Abbildungsgesetze I 230.
Orientierung über vertikale und horizontale Richtung, monokular III 212—116, binokular III 271—275, Prinzip der leichtesten O. III 55, 120, 516.
Ort, scheinbarer und geometrischer im Blickfelde III 136—137, im Sehfelde III 137.
Orthomorphe Raumbilder III 536, Scheindrücke III 541, Entfernung III 541.
Orthoplastische Raumbilder III 543, Scheindrücke III 546, Entfernung III 543.
Orthoskop Czermaks I 16.
Orthostereoskopie III 558.

Palpebrae I 34.
Panchromatisation (Schenck) II 365.
Paradoxer Versuch Fechners III 424, 431.
Parallaxe, entoptische I 177, 187, des indirekten Sehens III 138, 181, stereoskopische III 250, binokulare III 309.
Pars ciliaris Retinae I 24.
Peripherie der Netzhaut, farbenblind II 128, 347, Wahrnehmung von Bewegungen III 230.
Peripheriewerte reiner Lichter II 348, bei Diehromaten und anomalen Trichromaten II 352.
Peripherisehe Abbildung im Auge I 305.
Persistenz der optischen Gleichungen (bei Umstimmung des Sehorgans) II 366
Perspektive der Reliefbilder III 271—272.
Perzeption definiert III 11.
Petitseher Kanal I 32.
Phänakistskop II 184.
Phosphen II 7, der Akkommodation II 10. Druck-P. II 7.
Photographie des Augenhintergrundes I 225.
Photographien stereoskopische III 552.
Photographische Ophthalmometrie I 268.
Photometrie II 161—169, heterochrome II 349.
Photoptometer (Förstersches) II 266.
Pigment der Aderhaut I 13, Wanderung desselben II 42, 331.
Polarisationsbüschel Haidingers II 256—259.
Polyopie, monokuläre I 163, 172 (Polyopia monophthalmiea).
Presbyopie I 108, 117, 323.
Primäres Bild (bei kurzen Liehtreizen) II 369.
Primärstellung der Blicklinie III 39, 59, ihre Auffindung III 89—82.
Prinzip der leichtesten Orientierung III 55—60, 72—83, 119—120, 434—436, 516.
Prisma, Brechung im P. II 76.
Projektion, optische I 232, auf der Netzhaut I 107, 318, III 16, 190—191, 216, der subjektiven Erscheinungen III 217—221, stereoskopischer Bilder III 275—278.
Projektionskoeffizient, linearer I 232, 249, angulärer I 233.
Projektionstheorie III 16, 466.
Proportionierte Tiefenwahrnehmung III 318, 544.
Protanomale II 344.
Protanopen II 340.
Prüfung der Sehweite I 111—113, 118, 151, 162—163, des Farbensinnes II 353, 354, der binokularen Tiefenwahrnehmung III 564.
Pseudoskop III 257, 564.
Psychophysisches Gesetz Fechners II 147, für die Helligkeiten II 147, für die Sterngrößen II 147—148, für die Tiefenwahrnehmungen III 358, für Erkennung der Doppelbilder III 374.
Punkthoropter III 348.

Pupille I 13—15, Entfernung von der Hornhaut I 17, Veränderung derselben bei der Akkommodation I 120, 129, 136, 337, entoptische Beobachtung der Verengerung I 177.
Purkinjesche Bilder bei der Akkommodation I 121.
Purkinjesches Nachbild II 213, 369, überspringt die Fovea centralis II 371.
— Phänomen II 152, 302, fehlt in der Fovea centralis II 305.
Purpur II 54, seine Zusammensetzung II 105, s. Sehpurpur.

Quadrate erscheinen im Sehfelde verzogen II 158, III 142, 160.
Querdisparation III 316, 469.

Raddrehung des Auges III 38, ihr Gesetz III 39—44, 455—456, Einfluß der Konvergenz III 45, 117, der Hebung und Senkung III 117, willkürliche III 52—54, ihr Einfluß auf die Orientierung monokular III 213—217, binokular III 271—275, 285—290.
Radium II 23.
Raumbild III 535.
Raumvorstellung, ihre psychologische Natur III 458—461.
Rayleigh-Gleichung II 344, Prüfung mittels des Anomaloskops II 354.
Reagierendes Licht II 195, Farbe II 225.
Rechts- und linksäugige Eindrücke, Synchyse derselben III 464—467, Unterscheidung III 372, 400.
Recklinghausensche Fläche III 285.
Recurrent vision s. Purkinjesches Nachbild.
Reduktionsformen (des normalen Farbensystems) II 339.
Reduzierte Achsenlänge des Auges I 307.
— Fokalabstand I 239.
— Konvergenz I 239.
Reduziertes Auge I 77, 330, nach Listing I 77, seine Dispersion I 147—148, 151.
— optisches System I 68.
Reflexe der Kristallinse I 122.
Reflexion an kugeligen Flächen I 53.
Reflexionswinkel I 43.
Refraktionszustände des Auges und ihre Anomalien I 108, 114—119, 306—326, Untersuchung I 320.
Reiz, Reizung II 3—4.
Reizbarkeit II 3—4, ihre Veränderung durch Lichtwirkung II 194—223, durch elektrische Ströme II 14—17, 19—20, s. auch Adaptation und Umstimmung.
Reizsummation (binokulare) II 286.
Reliefbilder III 269—271.
Reliefperspektive III 277—281.
Resultierende Farbe II 225.
Retina I 22, s. Netzhaut.
Reversionsprisma als Stereoskop III 296, im Pseudoskop III 291, um willkürliche Raddrehungen hervorzubringen III 51—53.
Reziprozität der optischen Bilder I 197—205.
Richtkreise s. Direktionskreise.
Richtlinien im Sehfelde III 147.
Richtung des Sehens III 203—225, 437, 464—468, scheinbare der vertikalen und horizontalen Linien, monokular III 213—217, binokular III 271—275, auf ein gemeinsames Zentrum bezogen III 464.
Richtungslinie des Sehens I 77, 78, III 203.
Richtungsstrahl I 78.
Ringmuskel der Pupille I 15.
Röntgen-Strahlen II 21.
Rollung, Definition III 113, kompensatorische III 115.
Rot (objektiv definiert) II 54.
Rotblindheit II 122, 140, 340, s. auch dichromatische Farbensysteme an der Peripherie des Sehfeldes II 129, 140.

Sättigung der Farben II 109, verschiedene der Spektralfarben II 106—109, die größte durch Nachbilder zu erhalten II 207, 368.
Sagittal III 36.
Sagittalebene I 250.
Sammelbilder III 481.
Sansonsches Bildchen I 17, 121—122.
Santonin, Wirkung auf das Sehen II 142—143.
Satellit s. Perkinjesches Nachbild.
Schatten, farbige II 230; ihr Einfluß auf Erkennung der Form III 241, 258, 451.
Scheibe (Benhamsche) II 376.
Scheiben (rotierende) II 103, 175, Helligkeit II 193, stroboskopische II 185.
Scheinbar vertikale Linien III 273.
Scheinbarer Ort im Blickfelde III 137, im Sehfelde III 137, der subjektiven Erscheinungen III 217—223.
Scheinerscher Versuch I 104, 136, 170, III 220, zur Prüfung der Sehweiten I 112, zur Farbenmischung II 134.
Schematisches Auge, Listings I 76, 92, Helmholtz' erstes I 128, zweites I 302, Gullstrands exaktes I 300, 335, vereinfachtes I 303, 335, bei Akkommodation I 127.
Schielende mit Abweichung der Deckpunkte III 334—335, 438, 472—485, Änderung der Schrichtungs-Beziehungen III 438, 479, Wettstreit III 483, binokulare Tiefenwahrnehmung III 483.
Schlagschatten als Mittel die Form zu erkennen III 241, 258, 451.
Schlemmscher Kanal I 6, 125, 132.
Schlüsse, unbewußte III 5, 22—25, 528.

Schwankungen der Anschauungsform III 15, 245.
Schwarz als Körperfarbe II 109, unterschieden von dem Mangel an Empfindungsfähigkeit III 172—173.
Schwellenwerte (als Maß der Adaptation) II 264, ihre Abhängigkeit von der Objektgröße II 283.
Schwerpunktskonstruktion für Mischfarben II 112—118.
Schwindel III 207—210, 223, 233.
Schwingungsdauer der Lichtoszillationen I 36.
Sclerotica I 4.
Sehachse I 78.
Seheindruck (bei den binokularen Instrumenten) III 535.
Sehfeld III 137, Verschiebung gegen das Blickfeld III 138, 178—181, seine Ausmessung nach dem Augenmaße III 149—153, seine Lücken III 169, 179.
Sehgelb II 47.
Sehnenhaut I 4.
Sehnerv I 19, seine Reizung bei der Durchschneidung II 11, unempfindlich gegen Licht II 10.
Sehnervenapparat II 5, seine Erregung durch verschiedene Reize II 5—6, durch mechanische Reizung II 6—11.
Sehnerveneintritt im Augenspiegel sichtbar I 220, bei Bewegung sichtbar II 9—10, III 178—179, bei elektrischer Reizung II 16, gegen Licht unempfindlich II 24, Ausfüllung der Lücke III 170—179.
Sehpurpur II 327—329.
Sehrot II 44.
Sehsehärfe II 29—39, absolute, natürliche, relative, nach Entfernung der Linse I 313—315, der Zapfen und der Stäbchen II 311.
Sehsinnsubstanz II 5.
Seitenwendungswinkel des Blicks III 38, 71.
Sekundäre Korrespondenzbeziehungen (bei Schielenden) III 474.
Sekundäres Bild (bei kurzen Lichtreizen) II 369.
Sinnesempfindungen als Zeichen der Objekte II 5—6, III 17.
Sinnesnerven, ihre spezifischen Energien II 4—5.
Sinnestäuschungen III 5, 14, 434.
Skotom, zentrales, beim dunkeladaptierten Auge II 280, bei total Farbenblinden II 320.
Spektralfarben, ihre Reihenfolge, II 54—57, ihre Brechungsverhältnisse und Wellenlängen II 58, Veränderung ihres Aussehens mit der Intensität II 61—62, 154, ihre Übergänge II 62—64, Vergleich mit den Tönen der Skala II 63—64, ihre Mischung II 103, 104—107, 131—134, 138—140, 333—336; ihre verschiedene Sättigung II 106—109, ihre Stellung in der Farbentafel II 117, 139, ihre Stellung in Youngs Theorie II 119, sie sind noch weißlich II 121—122, 206, ihre Dämmerungswerte II 298—300, ihre Peripheriewerte II 348, 352, ihre Flimmerwerte II 350.
Spektrum, prismatisches II 53, theoretische Bedingungen für seine Reinheit II 86, Helligkeit desselben II 87—88, Methode der Darstellung II 89, Einfluß der Trübung der Gläser II 91, seine Grenzen II 57, Abweichung vom Interferenzspektrum II 58, Aussehen des lichtschwachen II 301.
Spezifische Energie der Sinnesnerven II 4—5.
Sphincter Pupillae I 15.
Spiegelstereoskop III 251.
Stäbchen, Funktion der St. nach der Duplizitätstheorie II 291—332, Qualität der Empfindung II 292, Reizwerte reiner Lichter II 296, Räumliche und zeitliche Unterscheidungsfähigkeit II 311, Beziehungen zur totalen Farbenblindheit II 316, ihre Schädigung als Ursache der Hemeralopie II 322, Beziehungen zum Sehpurpur II 44, 325.
Stäbchen-Zapfenschicht (musivische Schicht) der Netzhaut I 22, 26, Reflexion des Lichtes darin I 196, ihre Empfindlichkeit gegen das Licht II 29—30.
Stellungsfaktor III 467, Verdoppelung bei Schielenden III 477.
Stereographische Projektion III 85, 454—457.
Stereokomparator III 563.
Stereomonoskop III 297.
Stereophantaskop III 297.
Stereophoroskop III 297.
Stereoskop III 249—253, verschiedene Formen III 290—292, 297—299, Erscheinung der Entfernungen im St. III 552—559.
Stereoskopische Bilder III 298—299, Regeln ihrer Konstruktion III 275—277, Regeln für ihre Herstellung durch Photographie III 553—559.
— Differenz III 276.
Stereoskopisches Mikroskop III 293—295, 550, Augenspiegel III 295.
Stigmatoskopie, subjektive I 358, objektive I 369.
Strahlen, senkrecht zur Wellenfläche II 70, allgemeine Form dünner Bündel II 70—76.
Strahlenbündel, allgemeine Konstitution desselben, I 230.
Strahlenfläche I 231.
Strahlenvereinigung I 230, 232.
Strahlige Form kleiner Lichtbilder I 162—165.

Stroboskopische Scheiben II 184—185.
Subjektive Lichterscheinungen II 7—17, 254—262, schwer zu beobachten III 7—9, ihre Lokalisation III 217—223, s. auch Nachbild und Kontrast.
Summation der Reize (binokulare) II 286.
Symmetrische Systeme I 250.
Synchyse der rechts- und linksäugigen Eindrücke III 464.

Tachistoskop III 164, 373.
Täuschung über Neigung des Kopfes III 221, über Konvergenz III 265—269, über Richtung binokularer Linien III 271—274, binokularer Kreise III 274, mathematische Theorie beider III 285—290, T. des Augenmaßes III 159—168, 196, 247, Theorie hiervon III 200, 307, 492, über Farben s. Nachbild und Kontrast.
Täuschungen, geometrisch-optische III 196.
Tagessehen als Funktion der Zapfen II 291, räumliche und zeitliche Unterscheidungsfähigkeit II 311.
Tagvögel II 330.
Tangentialebene I 250.
Tapetenbilder, binokulare III 263.
Tapetum der Tieraugen I 197, 221.
Tautomorphe Raumbilder (der binokularen Instrumente) III 536.
Telemeter III 562.
Teleplaste III 562.
Telestereoskop III 259—260, Theorie III 284—285, 536, mit Fernrohren III 292—293, 547—548.
Tensor Chorioideae I 14, 21, Wirkung bei der Akkommodation I 126, 144—145.
Thaumatrop II 184.
Tiefe der Abbildung im Auge I 318.
Tiefendimensionen des Gesichtsfeldes III 235—302, beurteilt nach der scheinbaren Größe III 236, nach der Deckung der Objekte III 237, nach der perspektivischen Form III 238, nach den Schlagschatten III 241, binokular III 249—302, Genauigkeit der Wahrnehmung III 254—257, 353—355, Einfluß der Bewegung III 371—374, in Nachbildern III 374—375, psychologische Eigentümlichkeiten ihrer Wahrnehmung III 468, Augenmaß bei binokularer T. III 315—322, proportionierte T. III 318, Theorie derselben nach Panum und Hering III 441, 444—452.
Tiefenwerte (bei binokularen Instrumenten), monokulare III 537, binokulare III 538; Herings III 448, 507, 530.
Totalaberration, periphere I 255.
Tractus optici I 32.
Tränenkanälchen I 34.
Tränenpunkte I 34.
Translatorische Bewegungen der Augen III 105.
Transversal III 36.
Treppenfigur III 239.
Trichromaten, anomale II 343, vom normalen nicht physikalisch verschieden II 344, praktisch unterwertig II 346.
Tritanopie II 341.
Trübung der Augenmedien I 165, Einfluß auf das Spektrum II 91.

Ultrarotes Licht II 57.
Ultraviolettes Licht II 55—56, dringt zur Netzhaut II 59—61, Farbenton II 61—63, Beobachtungsweise II 91—95, gebraucht um die Kristallinse sichtbar zu machen II 94—95.
Umdrehungssystem I 235.
Umkehrung des Reliefs III 239—241, 400.
Undulationsstheorie I 35.
Unendlich dünne brechende Schicht ist einzuschalten erlaubt I 68.
Unterscheidung der Bilder beider Augen III 216, 375—377, 400.
Unterschiedsempfindlichkeit für Helligkeiten II 147.
Urteile (Verhältnis zu den Empfindungen) III 486.
Uvea I 13, 21.

Valenz, Valenzkurven II 340.
Vasa vorticosa I 15.
Venae ciliares I 15.
Verant-Stereoskop III 563.
Vergrößerung durch kleine Öffnungen I 107, im Augenspiegel I 208—209, eines optischen Instrumentes I 309—312, bei binokularen Instrumenten III 543.
Vergrößerungskoeffizient I 233.
Verschmelzungsfrequenz II 172, bei total Farbenblinden II 321, bei Tages- und Dämmerungssehen II 314, Abhängigkeit von Lichtstärke und Adaptation II 315.
Vertikale stereoskopische Differenzen III 266—270.
Vertikalhoropter III 351.
Vierfarbentheorie (Aubert) II 361.
Violett II 55.
Violette Gläser zur Prüfung der Dispersion I 148—151.
Violettsehen nach Santoningenuß II 142—143.
Visierebene III 37.
Visierlinie I 104, Einfallswinkel derselben I 270.
Visierlinien I 110, III 37, 131—132, Kreuzungspunkt ders. III 179.
Vorstellung, Definition III 11, 433, Art ihrer Wahrheit III 18—22.
Vorzeichen in den Abbildungsgleichungen I 246.

**W**ärme, strahlende, Unterschied vom Licht II 6, dunkle II 57, Grund ihrer Unsichtbarkeit II 59—60.
Wässerige Feuchtigkeit I 30.
Wahrnehmung aus Empfindung und Erfahrung kombiniert III 10—13, 496, der relativen Richtung III 129—195, der absoluten Richtung III 203—225, der Tiefendimensionen III 235—299, 468, 502.
Wasserblau II 55.
Webersches Gesetz II 147.
Weiß als zusammengesetzte Farbe II 105—108, kontrolliert mittels des Eigenlichts II 233.
Weißvalenzen (Hering) II 363.
Weitsichtigkeit I 108, 116.
Wellenfläche I 38, II 70.
Wellenlängen des Lichtes I 37, II 63, des äußersten im Spektrum II 58.
Wettstreit der Sehfelder III 371, 402—417, 439, der Konturen III 403—410, der Farben III 410—417, regionärer und örtlich unabhängiger III 475, der Sehrichtungen III 476—478.
Willkür in den Augenbewegungen III 46—54, 518.

**Z**apfen, der Netzhaut I 22, 26, Kontraktion durch Licht II 43, 331, sind gegen Licht empfindlich II 28—29, als räumliche Elemente des Sehens II 30—31, 33—34, Funktion nach der Duplizitätstheorie II 291, räumliche und zeitliche Unterscheidungsfähigkeit II 311.
Zeitliche Verhältnisse der Lichtwirkung II 369—374, bei kurzen Reizen, Ansteigen der Empfindung II 372, primäre, sekundäre und tertiäre Bilder II 369—372, bei periodischen Reizen, Talbotscher Satz II 174, Verschmelzungsfrequenz II 314—316, Änderung der Empfindung bei längerer Reizung s. Ermüdung.
Zentraler Strahl I 229, im Auge I 366.
Zentrierte optische Systeme I 44, Brechung in ihnen I 58—69.
Zentrierung, mangelhafte des Auges I 95.
Zentrum, optisches der Linsen I 68, der Richtungslinien I 77—78, der Visierlinien I 104, der Blicklinien III 37, der Sehrichtungen III 213, 465.
Zerrung am Auge gibt Scheinbewegung III 204.
Zerstreuungsbilder auf der Netzhaut I 101—111, 115, 317, Bedeutung für das Sehen I 118.
Zerstreuungskreise I 102, ihre Größe berechnet I 109, ihre farbigen Ränder I 149, ihre Helligkeit I 153—158, ihre sternförmige Figur I 161, nicht homozentrischer Strahlen II 75, ihre Projektion in das Gesichtsfeld III 257.
Zonentheorie II 359.
Zonula Zinnii I 22, 31, 127, 345.
Zusammensetzung von optischen Systemen, allgemeiner Fall I 240, zwei Systeme I 243, drei Systeme I 245.
Zyklopenauge, imaginäres III 216, 376 bis 377, 465.
Zylindrische Brillengläser I 170, 127—173.

## Berichtigungen.

### Band I.

Seite IX Zeile 21 von oben, lies: „wären“ statt „waren“.
„ 164 „ 2 von unten, lies: „29“ statt „129“.
„ 217 Rubrikzeile, lies: „185. 186.“ statt „186. 186.“.
„ 288 Zeile 1 von unten, lies: „92“ statt „91“.
„ 293 „ 26 von oben und Zeile 3 von unten, lies: „Monoyer$^{3}$“ statt „Monoyer$^{1}$“.
„ 303 Paginaziffer, lies: „303“ statt „330“.
„ 306 Zeile 22 von oben, lies: „$\cos^2 \delta$“ statt „$\cos^2{}_2$“.
„ 320 „ 25 von oben, lies: „149“ statt „119“.
„ 332 „ 10 von unten, lies: „index der Linse bei der“ statt „index der“.
„ 338 „ 12 von unten, lies: „60 S. 126“ statt „59 S. 120“.
„ 349 „ 27 von oben, lies: „Methodik“ statt „Methotik“.

### Band II.

Seite 65 Anmerkung, lies: „I 165. 166“ statt „142. 143“.
„ 161 „ lies: „S. 349—351“ statt „Zusatz II am Ende“.
„ 172 „ lies: „S. 311—316 und 369—373“ statt „Zusatz I, B 6“.
„ 179 „ lies: „S. 311—316“ statt „Zusatz I, B 6“.
„ 197 „ lies: „S. 369—372“ statt „Zusatz I, B 6“.
„ 213 „ lies: „S. 369—372“ statt „Zusatz I, B“.
„ 218 „ lies: „S. 371“ statt „Zusatz I, B“.
„ 224 „ lies: „S. 347“ statt „unter Zusatz II“.
„ 299 Die Fußnote gehört auf die vorige Seite (298).

### Band III.

Seite 105 Zeile 12 von unten, lies: „Vortreten“ statt „Vertreten“.
„ 399 „ 19 von unten, lies: „erklärte“ statt „befördern“.
„ 467 Anmerkung, lies: „39“ statt „29“.

*Fig. 3.*

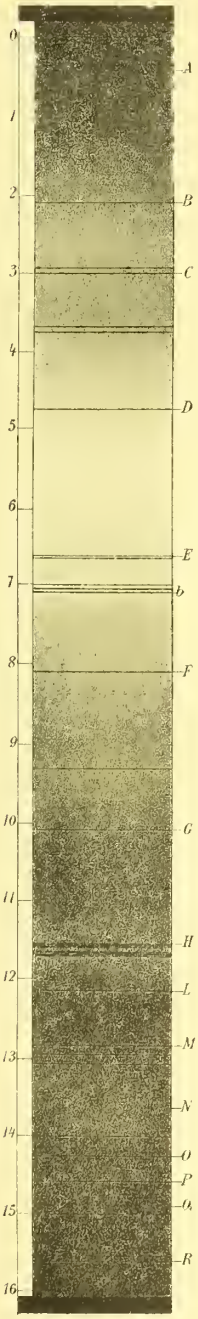



*Fig. 1.*

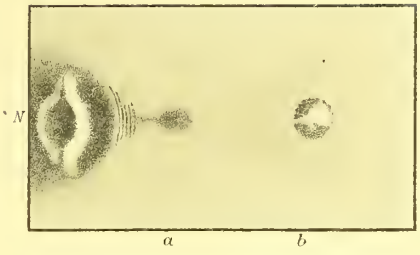
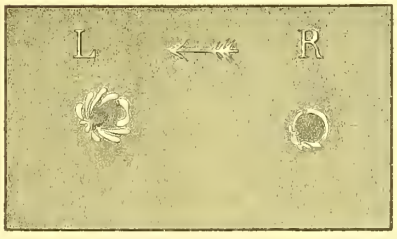



*Fig. 2.*




Verlag von Leopold Voss in Hamburg und Leipzig

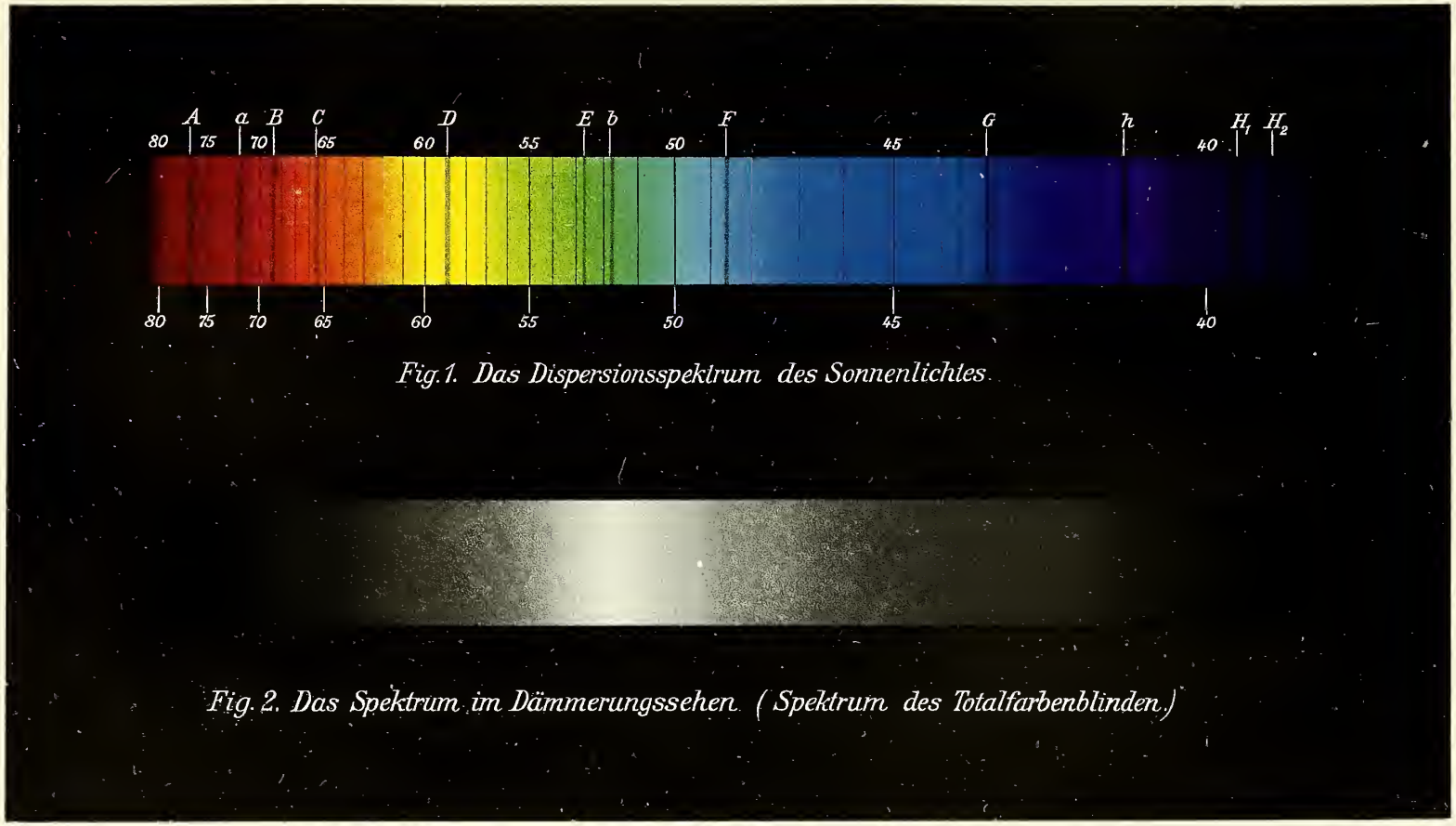
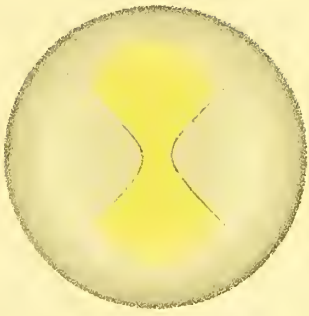



*Fig. 1. Das Dispersionsspektrum des Sonnenlichtes.*

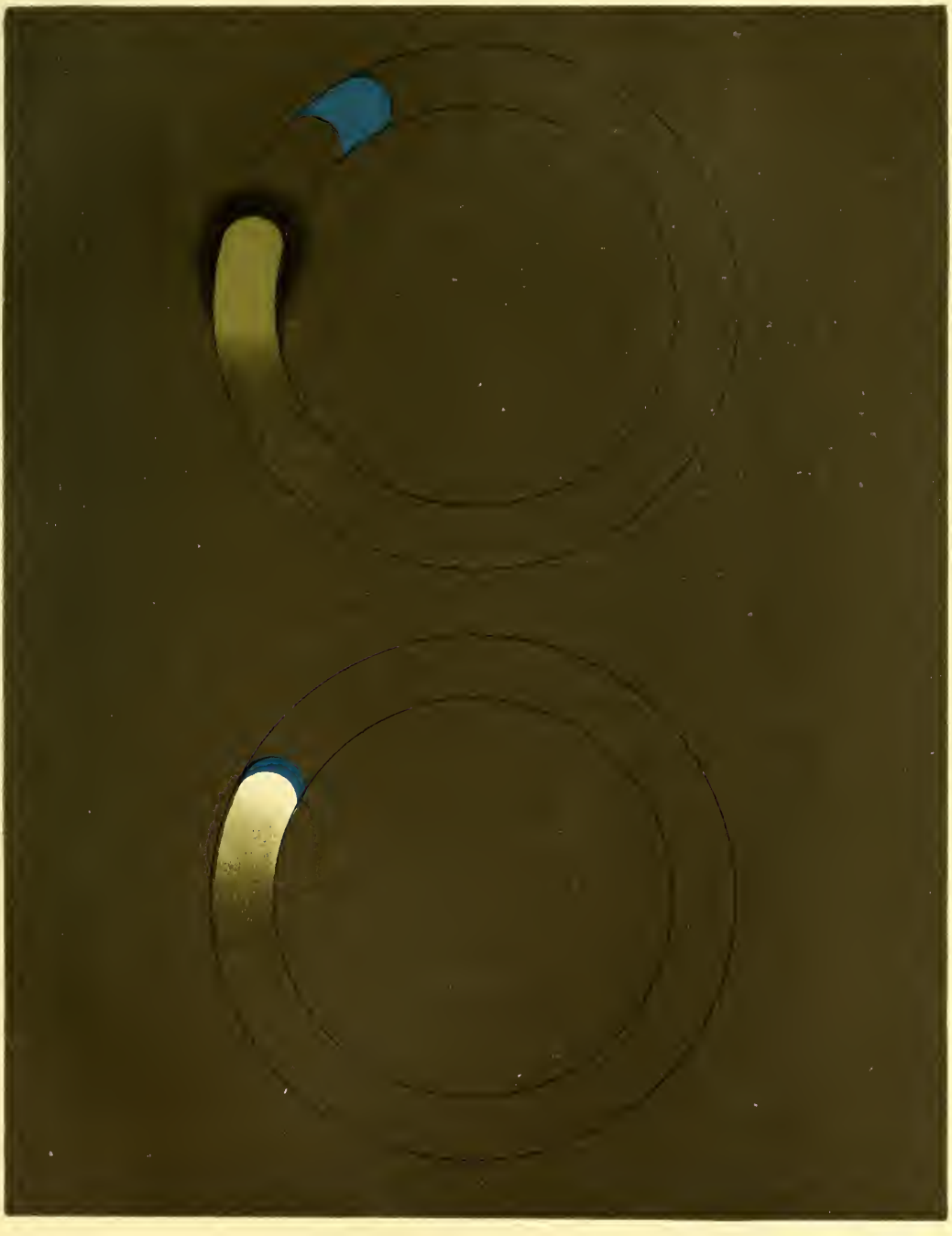
*Fig. 2. Das Spektrum im Dämmerungssehen. (Spektrum des Totalfarbenblinden.)*

Lith. Anst. Julius Klinkhardt, Leipzig.

Verlag von Leopold Voss in Hamburg (und Leipzig).



1.



2.

3.

Verlag von Leopold Voss in Hamburg und Leipzig.

Lith. Anst. Julius Klinkhardt, Leipzig.